

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ**

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Спеціальність 171 Електроніка
(код та назва спеціальності)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

на тему: Прозорі сонячні елементаи

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ДЕ-62

Улізько Юрій Віталійович
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Керівник доцент, доцент, к.т.н. Чадюк В.О.
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант Технічний розділ
(назва розділу) (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант
з нормоконтролю: доцент, доцент, к.т.н. Чадюк В.О.
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

[illegible]

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка

(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Юрій Улізько

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту Прозорі сонячні елементи

Керівник проєкту доцент, доцент, к.т.н. Чадюк В.О.

(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 року № 1196-с

2. Термін подання студентом проєкту 01 червня 2020 р. _____

3. Вихідні дані до проєкту - описати технологію та оцінити можливість використання у будівництві прозорих сонячних батарей _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

Огляд стану розвитку сонячних батарей. Недоліки кремнієвої технології сонячних батарей. Технологія прозорих сонячних елементів. Можливий економічний ефект.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

Креслення структурної схеми установки для зняття спектральної характеристики прозорих сонячних елементів. 2 плакати _____

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Ім'я ПРИЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання 04.02.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строки виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по сонячним елементам	04.02.2020-27.02.2020	
2	Аналіз властивостей сонячних елементів	27.02.2020-24.03.2020	
3	Дослідження властивостей сонячних елементів на основі ітербію	03.04.2020-28.04.2020	
4	Розроблення схеми вимірювальної установки	01.05.2020-17.05.2020	
5	Оформлення пояснювальної записки і кресленика, підготовка доповіді	17.05.2020-05.06.2020	

Студент

(підпис)

Юрій Улізько
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

Вячеслав Чадюк _____
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

В дипломному проєкті представлено огляд науково-технічної літератури по існуючим технологіям сонячних елементів. Показано перспективи використання таких пристроїв для світової економіки та для забезпечення електричної автономії людства у майбутньому.

Зазначені основні методи виробництва сонячних елементів в різних інтерпретаціях при основному розподіл на класи за прозорістю.

Наведено основні переваги та недоліки існуючих технологій та деякі рішення основних проблем. Описані можливі майбутні напрями розвитку окремих технологій та перспективи поєднання декількох технологій.

Розраховано потенційну потужність наразі лабораторної технології у практичному використанні. Розраховані значення навіть зважаючи на врахований коефіцієнт втрат фактично будуть ще трохи нижчими, у зв'язку зі змінами кута падіння сонячного випромінювання (чим далі від кута в 90° тим гірше генерація), від затінення та від забруднення як сонячних елементів так і навколишнього повітря пилом.

Досліджена конструкція, структурна, функціональна та електрична принципова схеми прозорого сонячного елемента, який забезпечує генерацію електричного струму, під дією сонячного випромінювання.

A N N O T A T I O N

The diploma project presents a review of scientific and technical literature on existing solar cell technologies. Prospects for the use of such devices for the world economy and to ensure the electrical autonomy of mankind in the future are shown.

The basic methods of production of solar cells in various interpretations at the basic division into classes on transparency are specified.

The main advantages and disadvantages of existing technologies and some solutions to major problems are presented. Possible future directions of development of separate technologies and prospects of combination of several technologies are described.

The potential capacity of currently laboratory technology in practical use is calculated. The calculated values, even taking into account the taken-up loss factor, will actually be slightly lower, due to changes in the angle of incidence of solar radiation (the farther from the angle of 90° the worse the generation), shading and pollution of both solar cells and ambient air by dust.

The design, structural, functional and electrical schematic diagram of a transparent solar cell, which provides the generation of electric current under the action of solar radiation, has been studied.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ОГЛЯД ВІДОМИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	9
1.1. Непрозорі сонячні елементи.....	13
1.1.1. Монокристалічні кремнієві сонячні елементи.....	14
1.1.2. Полікристалічні кремнієві сонячні елементи.....	18
1.2.Напівпрозорі сонячні елементи.....	20
1.2.1. Напівпрозорі кремнієві сонячні елементи.....	20
1.2.2. Напівпрозорі перовскітові сонячні елементи.....	21
1.3. Переваги та недоліки напівпрозорих сонячних елементів.....	26
2. Прозорі сонячні елементи.....	28
2.1. Технологія «прозорого» кремнію.....	32
2.1.1. Технологія самоочищення сонячних батарей.....	34
2.2. Прозорі сонячні елементи на органічній люмінесцентній основі.....	36
3. Прозорі сонячні батареї на основі ітербію.....	39
3.1. Ефективність прозорих сонячних батарей.....	40
3.2. Дослідження властивостей прозорих сонячних елементів.....	41
3.3. Переваги та недоліки сонячних елементів на основі ітербію.....	43
3.4. Розрахунок потенційно можливого використання.....	44
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	45
ДОДАТОК А.....	1
ДОДАТОК Б.....	1

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ			
Змн.	Арк. А	№ док-м. №	Підпис П	Дата				
Розроб.	Улізько Ю.В.				Прозорі сонячні елементи		Літ. Літ.	Арк.
Перевір.	Чадюк В.О							7
Реценз.								50
Н. Контр.	Чадюк В.О.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-62	
Затверд.	Ямненко Ю.С.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ККД – коефіцієнт корисної дії

ІЧ – інфрачервоне

УФ – ультрафіолетове

λ – довжина хвилі

НЧ – низькочастотний

η_{opt} – коефіцієнт оптичних втрат

W – кількість електроенергії

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

S – площа

η_s – коефіцієнт корисної дії прозорого сонячного елемента

w - Енергія сонячного випромінювання, яка падає за рік на 1 м²
горизонтальної поверхні

					<i>ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ</i>	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Під час всієї відомої історії розвитку та становлення людства використання енергія Сонця завжди йшло поруч. Від перших здогадок сфокусувати сонячний промінь, щоб розвести вогнище, і до сьогодні, коли технології значно виросли. Протягом останніх років, весь світ широко турбує питання екології на планеті, в зв'язку з чим з'явилась тенденція розвитку зеленої енергетики, яка підкріплена невичерпністю сонячного ресурсу.

У наш час найбільш поширеними є кремнієві сонячні батареї з досить низьким коефіцієнтом корисної дії (15 %). Але ресурси кремнію, потрібного для сонячних батарей, досить обмежені.

В рамках дипломної роботи розглянуто один з перспективних напрямків сонячної енергетики, а саме, прозорі сонячні елементи. Прозорі сонячні елементи можуть стати заміною у будівництві віконного скла, особливо в офісних центрах з великою площею остеклення.

Для прикладу потенціалу використання технології прозорих сонячних елементів на основі ітербію, було обрано найвищий у світі хмарочос – «Бурдж-Халіфа» в Дубаї (ОАЕ), з висотою 828 метрів та площею зовнішнього скляного фасаду у 142 000 квадратних метрів.

Але з урахуванням всіх можливих втрат, значення потужності, яку може генерувати лише одна така будівля в світі дуже значне. З урахуванням середньорічного споживання електроенергії в Україні на одне господарство, яке складає приблизно 2 МВт/рік, добутої електроенергії лише з одного такого хмарочосу, вистачило б більш як на 1000 домогосподарств.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата		9

1. ОГЛЯД ВІДОМИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У сучасному світі під вимушеним натиском екологічної обстановки все частіше у засобах масової інформації з'являється згадування про альтернативні методи отримання електроенергії. Статистичні дані надано на рис. 1.1. Одним з таких методів є сонячна енергетика.

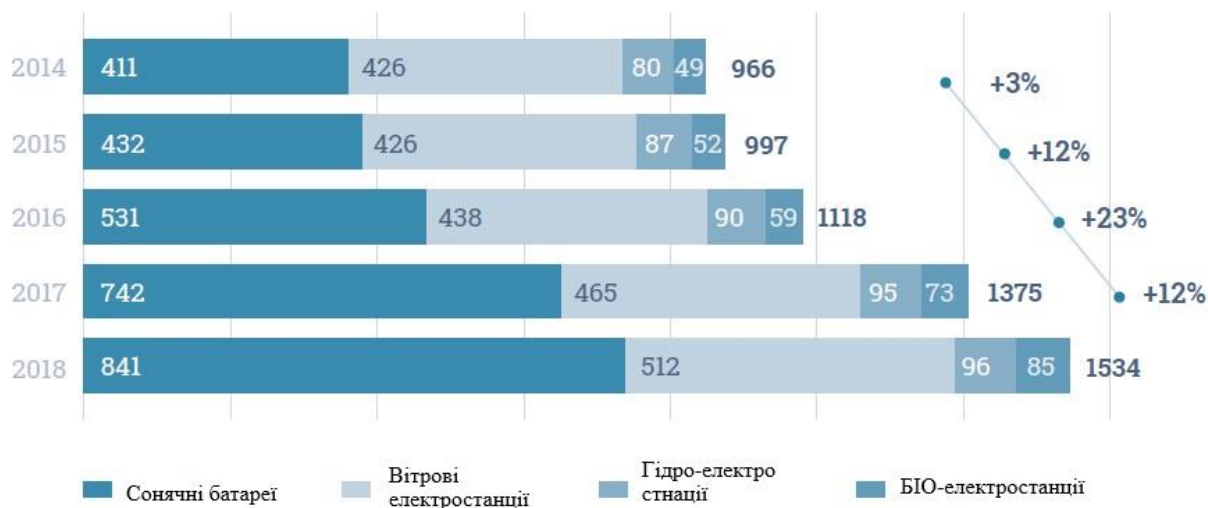


Рис. 1.1. Зростання відновлюваних джерел енергії за 2014 – I квартал 2018 рр.

Сонячна енергетика – це напрям енергетики в основі якого лежить використання сонячної енергії з наступною конвертацією її в електричну або теплову енергію. Одна з вагомих причин розвитку та лобіювання сонячної енергетики у світі в тому, що вона базується на відновлюваних джерелах, а також є екологічно чистою. На сьогоднішній день в основному сонячна енергетика використовується за умови збігу обставин, коли її використання виправдано з точки зору достатньої кількості сонячного випромінювання, яке дістається землі (рис. 1.2.) та коли використання інших методів отримання електроенергії невиправдане економічно або неможливе.

щорічна сума
глобального
опромінення

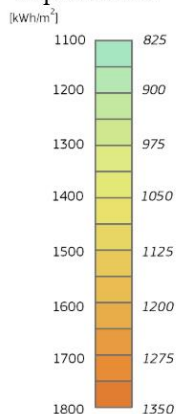


Рис. 1.2. Випромінювання і потенціал сонячної енергії в Україні

Основна проблема сонячної енергії в малому ККД, яку в свою чергу можна розділити на дві, а саме низький ККД сонячних елементів та втрати потужності сонячного випромінювання на шляху до сонячного елемента. Потік сонячного випромінювання, що проходить перпендикулярно через площу в 1 м² розтушовану ззовні поверхні атмосфери Землі, має 1367 Вт/м² енергії. В той же час проходячи далі через атмосферу землі, з причини її поглинання потік сонячного випромінювання який дістається до поверхні на рівні моря буде дорівнювати вже максимум 1020 Вт/м². Далі якщо врахувати зміни дня і ночі та віддалення від перпендикулярного значення кута падіння сонячних променів в залежності від широти, середнє значення за добу зменшиться ще як мінімум у три рази (рис. 1.3.). В свою чергу при віддаленні від екватора та приближенні в помірні широти взимку, ці значення зменшуються ще в два рази.

Змн.	Анк.	№ док.ум.	Підпис	Дата

ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ

Анк

11

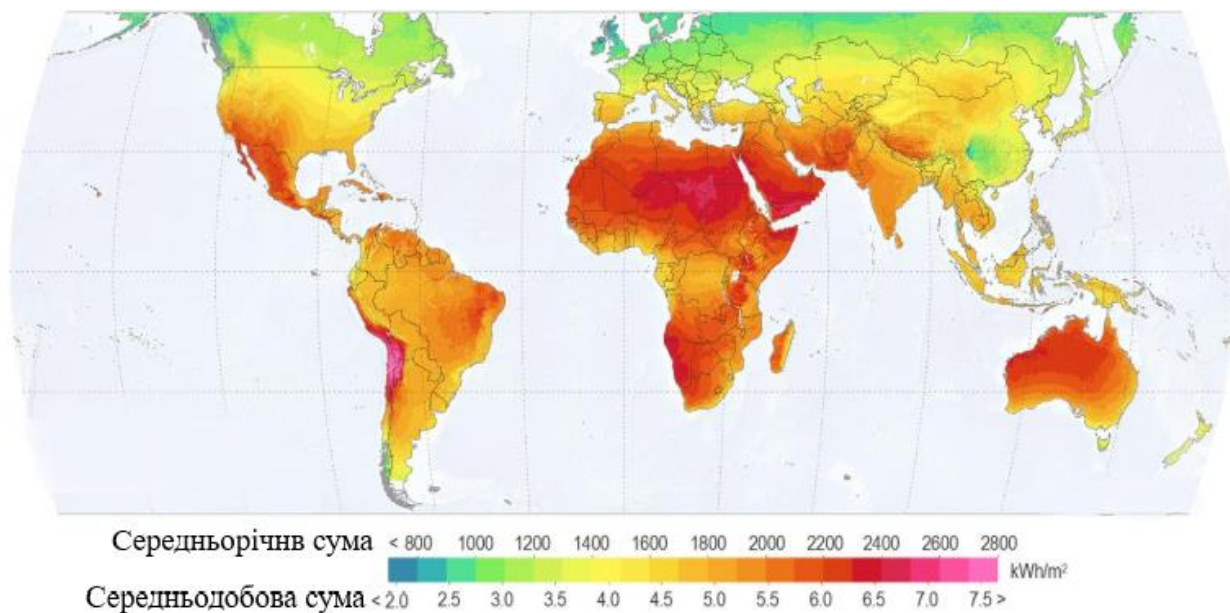


Рис. 1.3. Випромінювання сонячної енергії на карті світу

1.1. Непрозорі сонячні елементи

У наш час основним елементом, який використовується для сонячних елементів є кремній. На жаль кремнієві сонячні батареї мають достатньо малий коефіцієнт корисної дії до 20-25%. Ще одна суттєва проблема в тому, що для кремнієвих сонячних елементів підходить тільки чистий кремній, вартість отримання якого дуже велика. Для порівняння кремній в якому на 10 кг матеріалу припадає не більше 1 грама домішок коштує стільки ж скільки збагачений уран. Але запаси збагаченого урану в 100 000 разів менше від запасів кремнію. Це ще одна перевага на користь кремнію. Але на жаль, сьогодні масштаби видобування «чистого» кремнію залишають бажати кращого. Кількість видобування урану у 6 разів більше від якісного кремнію. Також видобування кремнію дуже «сумне» з погляду відношення об'єму початкової сировини до кінцевого матеріалу. Так на 1 тону піску в якому міститься 500 кг кремнію припадає тільки від 50 до 90 кг так званого сонячного сіліціуму, який в подальшому йде на виготовлення кремнієвих сонячних батарей. В подальшому до витрат також додається електроенергія, якої потрібно приблизно 250 кВт-годин на 1 кг кінцевого продукту. Але на сьогодні існує технологія розроблена німецькою фірмою Siemens, яка дозволяє значно зменшити витрати електроенергії і збільшити об'єми кінцевого продукту в 10-15 разів. Важливим в даній технології є те, що вартість отримання кремнію падає до 10-15 \$ за кілограм. На превеликий жаль, звичайний пісок для цього не підходить, для цього потрібні особливо чисті кварцити, які не скрізь існують в достатній кількості. Ще однією проблемою є термін «життя» таких батарей, він сягає 30-50 років. Але за цей час кількість електроенергії яку виробляє елемент для виготовлення якого було використано 1 кг сонячного сіліціуму прирівнюється до енергії 100 тон нафти або 1 кг збагаченого урану.

Також не мало важливою проблемою у використанні кремнієвих сонячних панелей є залежність генерації електроенергії від запилення. Так при забрудненні одного квадратного метру елемента всього 4 кубічними сантиметрами пилу спостерігається зниження генерації до 40%. На незначних

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Піппис	Лата		13

площах проблема забруднення не спричиняє багато незручностей, оскільки процес очищення дуже простий і відбувається шляхом проливання води з використанням звичайного «садового» шлангу. Але при збільшенні масштабів проблема запиленості набуває більшого характеру, навіть інколи ставить під питання економічну доцільність у відношенні між затратами на миття та матеріальним прибутками від вироблення електроенергії.

Проте перспектива використання поновлюваного ресурсу, який здатен забезпечити нас електроенергією на багато років підкріплена його екологічністю, у світі цінується значного більше.

На сьогодні ринок «зеленої» сонячної енергетики в найбільшій мірі представлений звичайними кремнієвими сонячними батареями. Існує два основних методи отримання кремнієвих пластин які використовуються в світі. Але у форматі мого диплому вони прирівнюються до однієї групи, непрозорих кремнієвих сонячних елементів. Оскільки промінь світла після контакту з поверхнею сонячного елемента не проходить далі і під елементом залишається характерна темна пляма тіні.

1.1.1. Монокристалічні кремнієві сонячні елементи

Виготовлення монокристалічних сонячних елементів (рис. 1.4.) потребує використання чистого кремнію. Пластини можна виготовити з використанням методу Чохральського або тигельним методом (рис. 1.5.).



Рис. 1.4. Монокристалічний сонячний елемент

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата		14

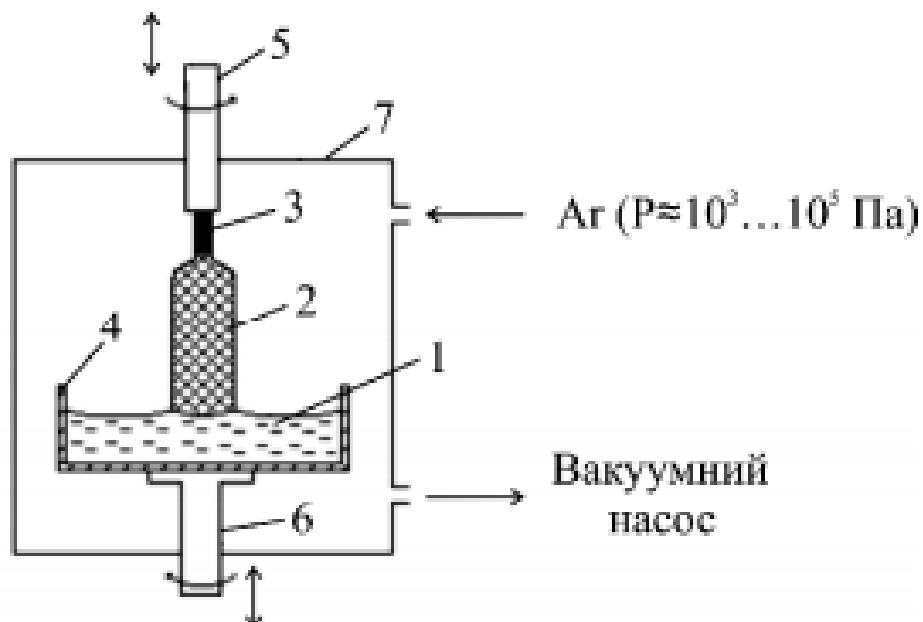


Рис. 1.5. Схема установки для вирощування монокристалічного кремнію методом Чохральського: 1 – розплав кремнію; 2 – монокристалічний злиток кремнію; 3 – кристал-приманка; 4 – кварцовий тигель; 5 – вал приманки; 6 – вал тигля; 7 – водоохолоджуваний кожух

А саме безпосередньо процес полягає в тому, що чистий кремній з мінімальною кількістю домішок та високим масовим вмістом діоксиду кремнію розплавляється у великому тиглі під дією високої температури приблизно 1415 °С. Перед цим кремній очищується від кисню шляхом високотемпературного плавлення і синтезу з додатковим додаванням хімічних речовин. Потім у тигель з розплавленим кремнієм додається запал, який являє собою кремнієвий стрижень як зразок майбутнього кристалу. Внаслідок цього навколо стрижня починається процес формування нового кристалу під час якого сам стрижень та тигель обертаються в різні сторони. Використання зразку кремнію дозволяє отримати однорідний кристал, так як атоми наростаючи шар за шаром на своєрідну приманку формують чітку структуру. Сам по собі процес досить тривалий, але результат того вартий, оскільки формується великий, однорідний кристал.

Процес обробки починається з оцінки геометричних параметрів, калібрування і надання монокристалу потрібної, псевдо квадратної форми. Оскільки після виходу з тигля монокристал кремнію має круглу форму, що не

дуже зручно з погляду подальшої обробки. На цьому етапі основним недоліком є те, що для формування псевдо квадратної форми, монокристал потрібно трохи обрізати. На наступному етапі початково оброблений монокристал ріжеться сталевими нитками в карбід-кремнієвій суспензії або в алмазно-імпрегрованій суспензії за допомогою дроту на пластини товщиною 250-300 мкм (Рис. 1.6.).

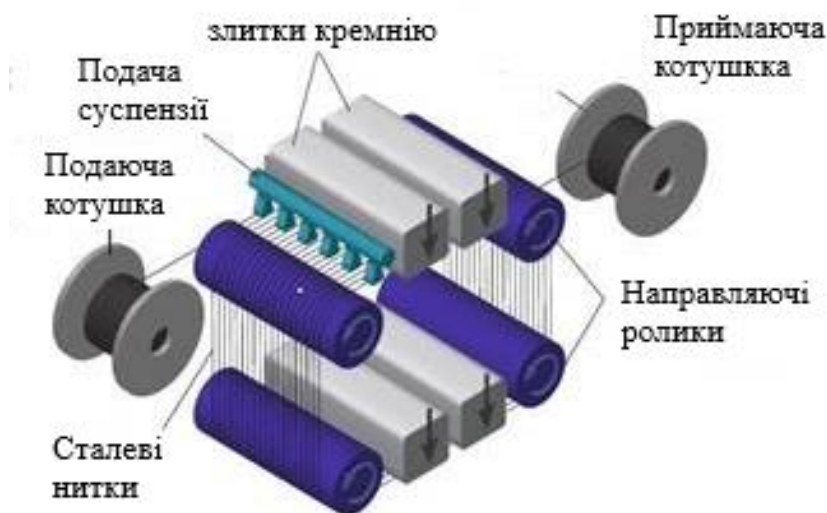


Рис. 1.6. Процес різання монокристалу кремнію на пластини

Потім після очистки пластини перевіряються на якість та кількість виробленої енергії.

Наступним етапом до монокристалу кремнію додають шари бору і фосфору, які в подальшому отримують відповідно вільні електрони та дірки. В наслідку чого між шаром фосфору і бору з'являється р-п перехід який генерується потраплянням на поверхню монокристалу сонячного світла. Далі монокристал комплектується сіткою з електродів по обидва боки пластини, які будуть намагатися компенсувати дірки на іншій частині пластинки в наслідок чого з'являються напруга та струм (Рис. 1.7.).

Сітка з електродів

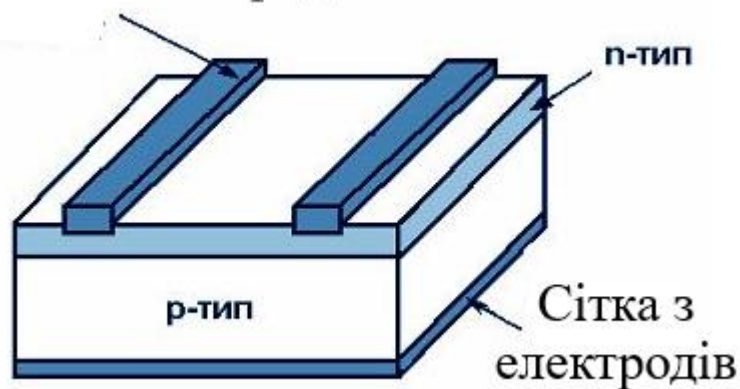


Рис. 1.7. Формування р-п переходу на монокристалі

Для отримання потрібних характеристик монокристалічні модулі з'єднуються в ланцюжки, а потім в блоки. Як правило один сегмент має 2 Вт потужності і 0,6 В напруги. Послідовне з'єднання сегментів дозволяє досягти потрібного рівня напруги, а паралельне збільшує силу утвореного струму. На наступному кроці сформовані блоки сегментів захищаються тонким шаром захисної плівки, переносяться на скло та фіксуються у прямокутній рамці до якої кріпиться розподільна коробка. В якості останньої перевірки на готовому модулі вимірюються вольт-амперну характеристику.

Технологія виробництва монокристалічних сонячних елементів досить дорога, але її переваги високий ККД на рівні 17-22%.

1.1.2. Полікристалічні кремнієві сонячні елементи

Основна відмінність полікристалічних кремнієвих сонячних елементів (Рис. 1.8.) від монокристалічних полягає в методі вирощування кристалу.

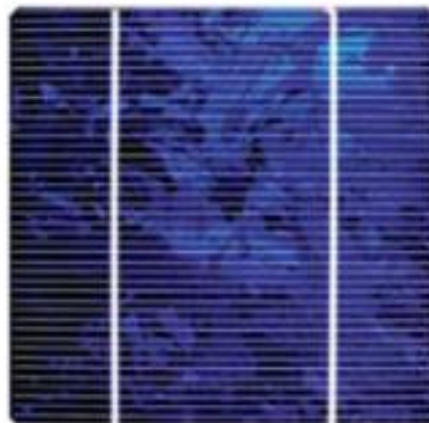


Рис. 1.8. Полікристалічний кремнієвий елемент

Існує декілька способів виготовлення полікристалу кремнію, але на сьогодні найпопулярніший метод, схему якого зображено на рис. 1.9. займає 75% виробництва це Siemens – процес.

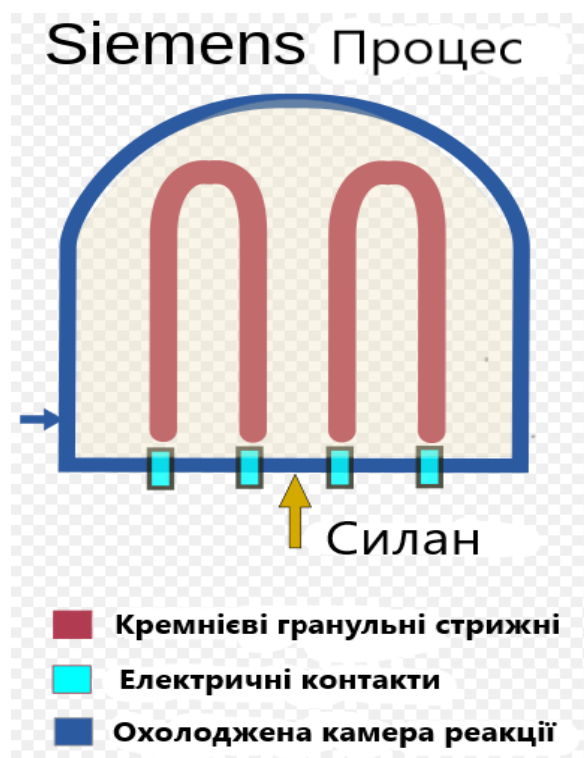


Рис. 1.9. Електрична схема Siemens- реактора

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк.
						18
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основна суть методу полягає в тому, що на відміну від нарощування монокристалу кремнію, використовується технологія взаємодії парогазової суміші з водню і силану з поверхнею кремнієвих злитків розігрітих до температури 650-1300°C з наступним осадженням вільного кремнію. В наслідок чого вивільнюються атоми кремнію, які в свою чергу під час повільного охолодження утворюють кристал з деревовидною (дендритною) структурою. В наслідку чого отримують полікристалічний кремній, який являється сукупністю з багатьох різних кристалів, які складаються в єдиний модуль. Помітною різницею є незвичний відблиск «металевих пластівців».

Як наслідок через відносну простоту виготовлення та зменшення затрат на електроенергію полікристалічні кремнієві сонячні елементи є дешевшими, але програють у ККД, який сягає 12-18%. Виходячи з ККД полікристал при такій же номінальній потужності програє в габаритах, але виграє у вартості на 10% при порівнянні з монокристалом.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.2.Напівпрозорі сонячні елементи

1.2.1. Напівпрозорі кремнієві сонячні елементи

Перехідною ланкою сонячної енергетики була спроба збільшення прозорості кремнієвих сонячних елементів, яка свою чергу розширює спектр їх використання. Оскільки дає змогу пропускати через сонячну батарею світло в наслідок чого тінь від пластин не заважає росту рослин. Перша спроба на шляху до вирішення цієї проблеми була з одного боку більш ніж очевидно. На прозору діелектричну підкладку наприклад зі скла чи пластику встановлювалися кремнієві сегменти в несучільному розташуванні, наприклад в шаховому порядку або лініями з пропуском, що забезпечувало проникання світла під батарею (рис. 1.10.).

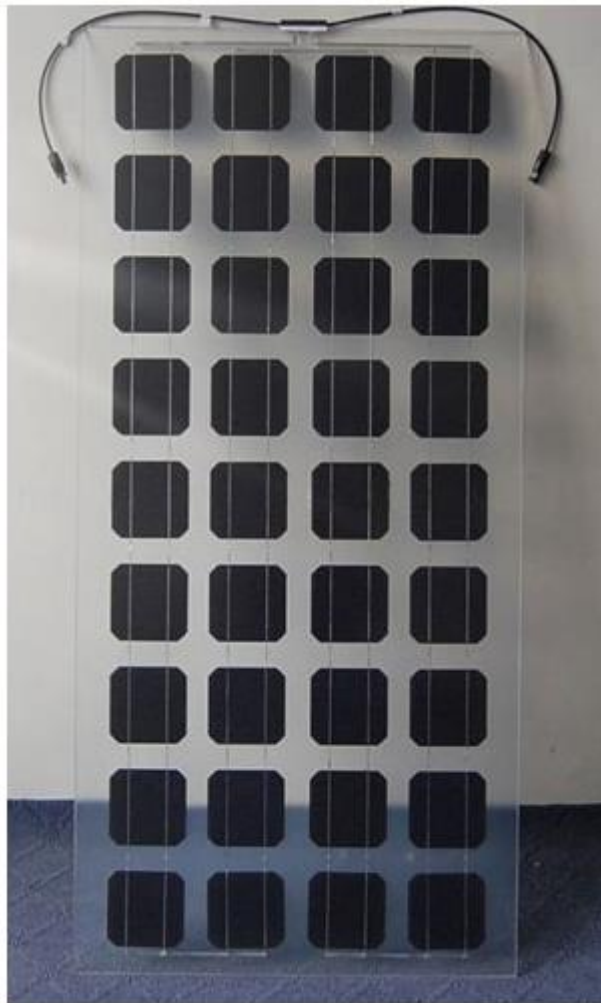


Рис. 1.10. Напівпрозорий сонячний елемент

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата		20

Дана технологія має недоліки в плані зменшення ККД, по причині наявності меншої кількості кремнієвих сонячних елементів на квадратний метр. Але робить саме по собі їх використання можливим наприклад на дахах теплиць.

1.2.2. Напівпрозорі перовськітні сонячні елементи

Повноцінним другим етапом розвитку сонячних елементів став відхід від використання кремнію та заміну його новими структурами зокрема перовскітом, який зображено на рис. 1.11.

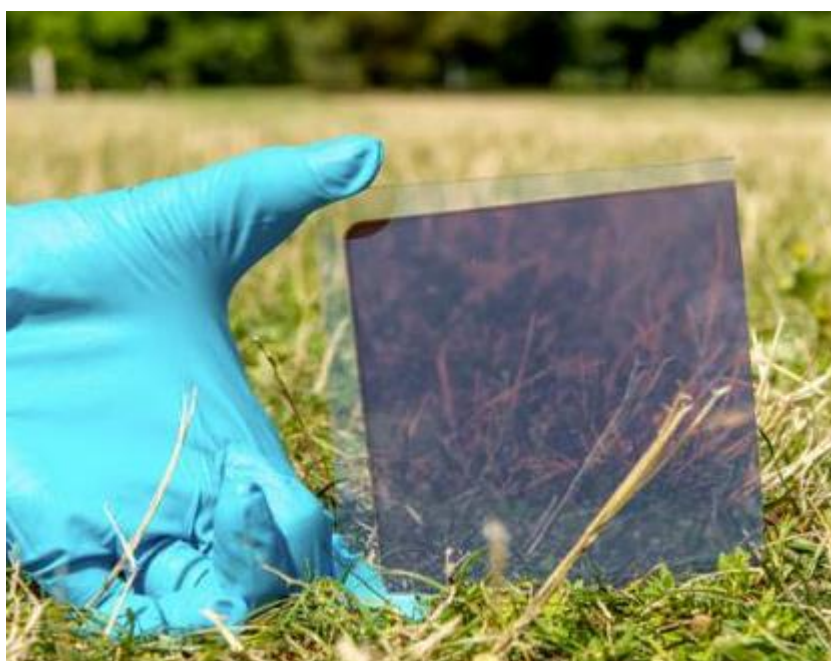


Рис. 1.11. Сонячний елемент на основі перовскіту

Одним з перспективних матеріалів останніх років стали сполучення CaTiO_3 – перовскіти. Вони зустрічаються в природі не надто часто, але їх інгредієнти досить розповсюджені на Землі. З них легко при низьких температурах (100–150 °C) отримувати висококристалічні плівки. Електрони в плівці сонячного елемента залишаються зв'язаними із своїми атомами, бо це – діелектрик. Під дією сонячного світла деякі електрони отримують додаткову енергію і переміщуються по кристалічній решітці елемента, поки не перейдуть в електрод, створюючи струм, або не попадуть у пастку, перетворивши свою

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

енергію у безкорисне тепло. Структура та процеси генерації енергії в перовскітних сонячних елементах зображені на рис. 1.12.

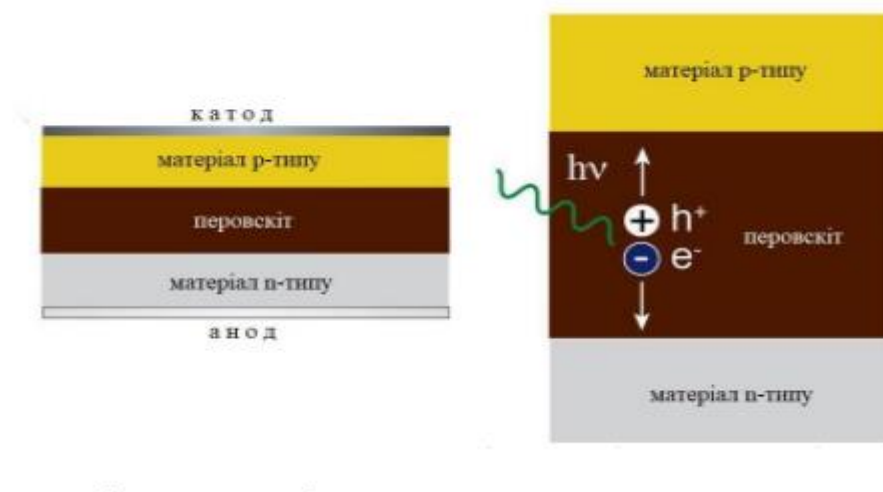


Рис. 1.12 Структура та процеси генерації енергії в перовскітних сонячних елементах

«Перовскіт – це мінерал переважно чорного або червоно-коричневого кольору з особливою структурою кристалічної решітки (Рис. 1.13). Він багатий вмістом домішок титану, ніобію, заліза, церію, кальцію, танталу. Структура перовскіту настільки унікальна, що на її основі можна створювати цілий ряд матеріалів з різними властивостями. Від високотемпературних надпровідників і напівпровідників до наноструктур. Всі такі речовини отримали назву перовскітні матеріали» [8].

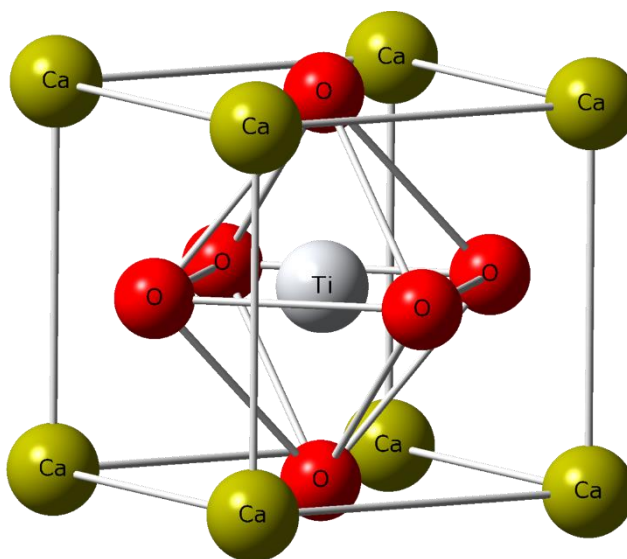


Рис. 1.13. Ідеалізована структура перовскіту CaTiO_3

До того ж, різноманіття матеріалів було представлено в різних модифікаціях від наноплівки до нанониток.

Перовскітові сонячні елементи – це фундаментально новий тип фотовольтаїчних пристроїв, які за прогнозами вчених в найближчому майбутньому дадуть гідну конкуренцію на світовому ринку зеленої енергетики широко використовуваним сонячним елементам на основі кремнію.

Сама по собі технологія нанесення перовскіту на основу є менш витратною в порівнянні з виготовленням кристалу кремнію хоча б в тому аспекті, що процес нанесення перовскіту відбувається за значно меншої температури до 300 °С, а зазвичай 100-150 °С. Що в свою чергу через невисокі температури дає змогу наносити перовскіти не тільки на скло, а навіть на полімерні плівки. Існує два розповсюджених методи нанесення шару перовскіту на основу, за допомогою випаровування та струменевий друк. На відміну від кремнієвих пластин, які жорсткі та товсті, перовскітові плівки тонкі, наносяться шаром приблизно від 300 нм до 1 мкм та гнучкі.

В основному в зв'язку з пластичністю перовскітних сонячних елементів, (Рис. 1.14.) вчені передрікають, що в недалекому майбутньому вони зможуть повністю витіснити звичний кремній з ринку.

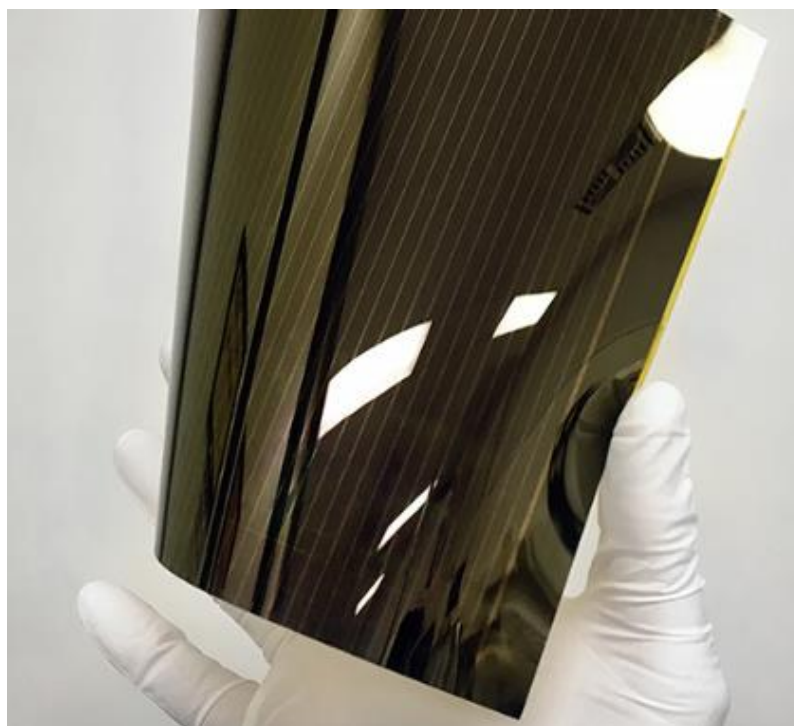


Рис. 1.14. Перовскітний елемент на полімерній (гнучкій) основі

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Дата		23

Перші перовскітні сонячні елементи не могли вихвалитися своїм ККД оскільки він був всього 4-5%, але з часом та розвитком особливостей технологій виробництва, вчені змогли підняти його до значень від 12% до 18%, при цьому зберігається пропускання світла понад 10% . Що в свою чергу в поєднанні з гнучкою підкладкою значно збільшує області та методи використання перовскітних сонячних елементів. За прогнозами вже в найближчому майбутньому, дана технологія впишеться в архітектуру міст і всюди стіни будинків будуть покриті плівками з перовскітом, а подекуди навіть вікна в містах де доречним буде використання ефекту тонування скла.

Дослідження перовскітів не зупиняються і вчені методом спроб та помилок змінюючи структуру матеріалу дійшли висновку, що перовскітні структури у вигляді нанониток дозволяють отримати максимально перспективне співвідношень характеристик для створення сонячних батарей. В результаті чого була напрацьована принципіально нова методика отримання перовскіту з ниткоподібною морфологією. В рамках дослідження науковці вперше в світі експериментально відстежили процес утворення протяжних нанониток, які в свою чергу на наступних етапах перетворюються на перовскіт, але з ниткоподібною структурою (Рис. 1.15.).

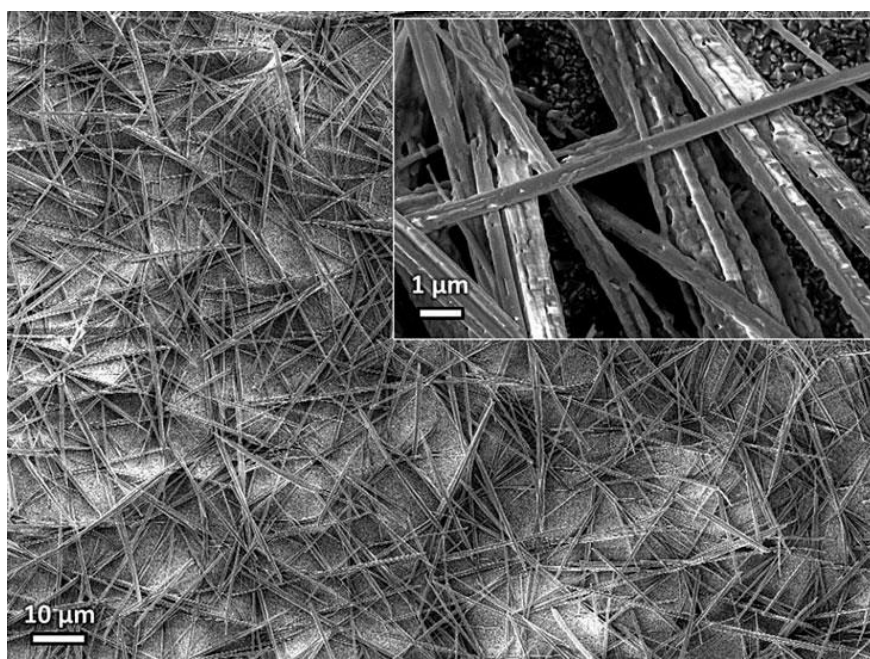


Рис. 1.15. Ниткоподібна структура перовскіту

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		24

Ще одна значуща проблема з якою зіштовхнулися розробники перовскітних сонячних батарей, це дуже швидкий рівень деградації шару. У першим зразках він сягав буквально хвилини, науковцям вистачало часу тільки на те щоб зняти зі зразка характеристики і відразу ж він псувався. Але технологія була дуже перспективною, що змушувало вчених з кожним наступним зразком збільшувати час життя структури. Основним вирішенням цієї проблеми, стало забезпечення захисту перовскітових плівок від надмірної вологи та захисту від великих перепадів температур.

Максимальна напруга яку вдалося досягнути при використанні елементів на перовскітах сягає значення 1,05 В при порівнянні для кремнієвих 0,7В. Корисною також є здатність генерації світла перовскітами при освітленні їх лазером, що дає здатність використовувати їх в ролі люмінесцентних елементів. Навіть є повідомлення про дуже незвичне застосування, а саме з допомогою використання сонячної енергії виробленої двома перовскітовими сонячними елементами з ККД-12%, відбувається вироблення водневого палива шляхом розкладу води на водень та кисень.

Однією з важливих переваг перовскітних елементів все ж таки є їх низька собівартість, якщо проводити порівняння зі звичними батареями на основі кремнію. На конференції, присвяченій розвитку перовскітних сонячних елементів були опубліковані матеріали в яких зазначалося, що сума затрачена для вироблення 1 ГВт енергії сонячними елементами з перовскіту буде в районі 42 млн доларів. В той же час як така сама кількість енергії вироблена за допомогою кремнієвих сонячних елементів буде на рівні 154 млн доларів, що в свою чергу більше від попередньої технології майже у 4 рази.

Ще одна менш значна економічно, але від цього не менш значна екологічно перевага перовскітних елементів впливає з їх виробництва. А саме кількість свинцю, яка потрібна для виробництва менша у 8-9 разів у порівнянні з кремнієвими сонячними елементами.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Дата		25

1.3. Переваги та недоліки напівпрозорих сонячних елементів

Проведено огляд відомих технологій сонячних батарей. Починаючи від першого етапу використання тільки кремнію, елементи на базі якого були не прозорі і далі до перовскіту, який дає хоч і не значну, але все таки прозорість. Перший етап умовно можна розділити на два, де в першому буде використання монокристалів кремнію, а в другому полікристалів.

Найперший етап, монокристалічні кремнієві сонячні елементи:

Переваги

- + довгий термін життя 30-50 років
- + на даний момент технологія повністю відпрацьована
- + значні запаси кремнієвого піску
- + використання майже невичерпної сонячної енергії
- + екологічність
- + високий ККД на рівні 17-22%

Недоліки

- підходить тільки чистий кремній
- складність технології виробництва
- багато «обрізків»
- об'єму початкової сировини до кінцевого матеріалу (1000кг/50-90кг)
- мала кількість видобування кремнію
- залежність від запилення

Полікристалічні елементи:

Переваги

- + простіша та дешевша технологія виробництва
- + при однакових габаритах виграє у вартості на 10% у порівнянні з полікристалом

Недоліки

- нижчий ККД 12-18%

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Дата		26

- залежність від запилення

Другий етап, напівпрозорі сонячні елементи.

Напівпрозорі кремнієві сонячні елементи:

Переваги

- + збільшений спектр використання
- + пропускають сонячне світло рід батарею

Недоліки

- менший ККД
- нерентабельна технологія

Напівпрозорі перовськітні сонячні елементи:

Переваги

- + виробництво при низьких температурах
- + менша кількість свинцю для виробництва у порівнянні з кремнієм
- + кардинально нова технологія
- + можлива пластичність
- + пропускання світла понад 10%
- + максимальна напруга 1.05 В у порівнянні з кремнієм 0.7 В
- + Можливість використання як люмінесцентних елементів
- + Низька собівартість

Недоліки

- Швидка деградація поверхні
- порівняно низький ККД 12-18%

Загалом зараз активно розвиваються елементи на перовскітах, вони дешевші але мають менший ККД, в свою чергу кремнієві сонячні елементи вже вивчені повністю, трошки дорожчі, але мають більший ККД. Але що перші, що другі затребувані на ринку.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата		27

2. Прозорі сонячні елементи

Вчені з усього світу ніколи не зупиняються не тільки у розвитку відомих технологічних рішень, а ще й у винайденні нових. Так наступним кроком у розвитку технологій для використання сонячного випромінювання з метою конвертації його в електроенергію стала ідея повністю прозорих сонячних елементів (Рис. 2.1.) Наразі це наймолодша технологія і сьогодні вона знаходиться на початковій умовно кажучи «лабораторній» стадії розвитку.

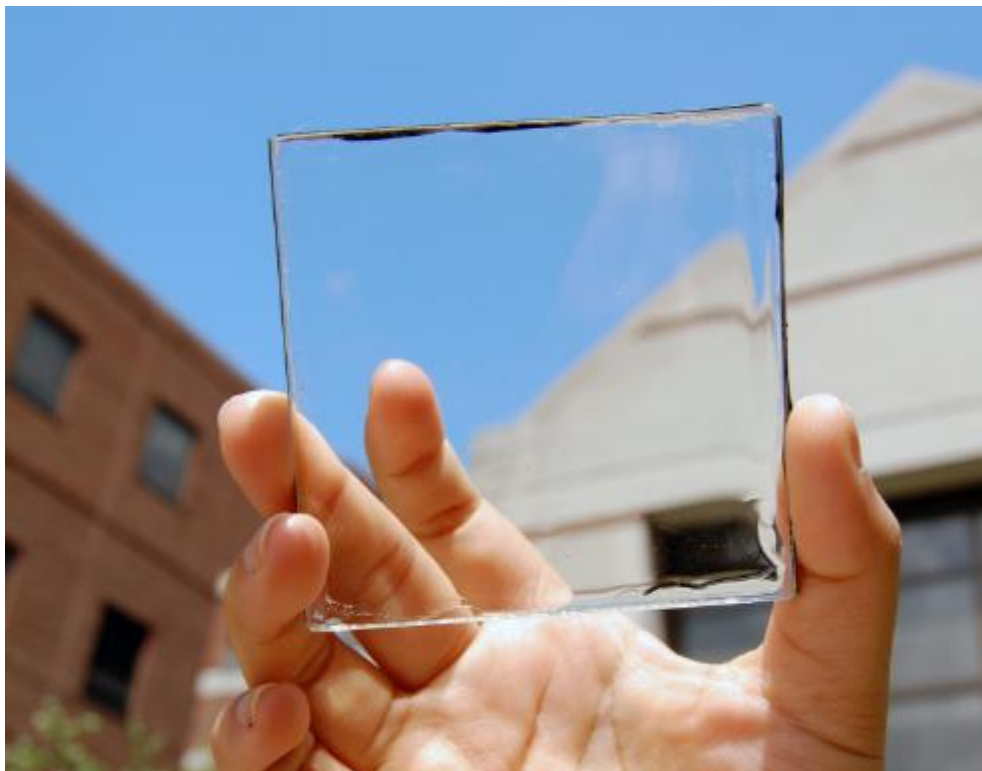


Рис. 2.1 Приклад прозорого сонячного елемента

Головний недолік, який відразу кидається в око – це малий ККД прозорих сонячних елементів, близько 5% , що в свою чергу порівняно з кристалічними структурами в яких ККД 17-20%, а при поєднанні кремнієвих елементів з перовскітними в лабораторних умовах максимум ККД на сьогодні складає 44%, дуже мало. Але така велика розбіжність зовсім не бентежить вчених, оскільки цією технологією займаються лише 5 років, що зовсім не стає в порівняння з часом витраченим на дослідження та удосконалення кремнієвих сонячних елементів, який складає понад 50 років.

Наступним з недоліків є ціна, яка на даний момент значно більша ніж у конкурентних технологій. Зараз висока ціна в основному обумовлена малими

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Підпис	Дата		28

об'ємами виробництва, оскільки наразі в основному це виробництво в лабораторіях для дослідів. Але перехід на масове виробництво дозволить покращити технологію внаслідок чого відбудеться зменшення вартості кінцевого продукту.

Також значним недоліком у житлових приміщеннях з використання сонячних батарей є розбіжність піку генерації та піку споживання електроенергії, але це можна вирішити шляхом встановлення енергонакопичувачів, іншими словами – акумуляторних батарей. В свою чергу в офісних приміщеннях де основне споживання електроенергії припадає на сонячну частину доби таких проблем не буде виникати, бо перепади в піках менш значні.

Не менш значною під час використання цієї технології є запиленості, оскільки в мегаполісах ця проблема частіше зустрічається ніж у віддалених від міст регіонах. Необхідність частого очищення поверхні від пилу та бруду, може значно знизити економічну ефективність використання прозорих сонячних батарей.

Не можна не зважати на ще одну проблему, а саме проблему затінення сонячних елементів, що в мегаполісах дуже важливо оскільки висока щільність забудови зменшує кількість сонячного випромінювання, яке потрапляє на сонячний елемент, внаслідок чого зменшується генерація електроенергії. Але в перспективі в наслідок розвитку технології буде підвищуватися ККД та збільшуватися генерація від непрямого опромінення.

Важливою перевагою саме прозорих сонячних батарей є їх «непомітність» у загальному архітектурному ансамблі міста. На перший погляд – це просто склопакет, який не заважає проникненню світла у приміщення та як бонус виробляє електроенергію. Що в свою чергу з загальною архітектурною тенденцією використання скла на зовнішніх фасадах будівель в перспективі надає значні переваги. На сьогодні співвідношення даху на якому можна встановити сонячні батареї до фасаду, по запевненням архітекторів складає 20% даху до 80% скляного фасаду.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		29

«Сумарна площа скляних поверхонь лише у США оцінюється в 5-7 мільярдів (!) квадратних метрів. Потенційно, якщо замість скла встановити прозорі сонячні панелі, то вони зможуть покрити близько 40% всієї потреби Сполучених Штатів в електроенергії;»[11]

Також є місця де неможливе встановлення звичайних сонячних елементів, з причини історичної та архітектурної цінності будівель. Для прикладу на території Києво-Печерської лаври або Софіївського собору неможливо встановити звичні сонячні батареї оскільки вони громіздкі, важкі та естетично непривабливі, або перший корпус Київського Політехнічного інституту, який є пам'яткою архітектури. Звичайно ці об'єкти не займають першість у споживанні електроенергії, але використання прозорих сонячних батарей у вікнах значно б зменшили бюджетні витрати на їх утримання та надали певну автономність без будь-яких видимих архітектурних змін зовнішності.

Ще один безумовний плюс на користь саме прозорих сонячних батарей, це їх перспектива використання у поєднанні з електроприладами. Наприклад покриття екрану смартфона, планшету або ноутбука прозорими сонячними батареями дозволить збільшити їх термін життя від акумуляторної батареї та надати певну автономність, оскільки в перспективі користувачеві у надзвичайних умовах, коли немає доступу до працюючої розетки можна буде використовувати свій дивайс.

Також є можливість використання прозорих сонячних батарей у автомобілебудуванні. Оскільки світова тенденція останнього десятиліття передбачає збільшення електромобілів на автошляхах світу, то перспективною є можливість встановлення прозорих сонячних батарей замість скла та скляного даху автомобіля. Така персональна «підзарядка» в свою чергу збільшує можливий пробіг електромобіля, а також робить можливим процес зарядки в місцях де спеціалізовані зарядні станції для електромобілів відсутні.

Прозорі сонячні елементи в першу чергу створені з метою не замінити всі відомі на ринку «конкурентні» технології, а доповнити їх. Адже саме поєднання звичних у нашому розумінні кремнієвих сонячних батарей на даху

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Піппис	Лата		30

будівель з прозорими сонячними елементами замість звичайних склопакетів в перспективі надасть можливість отримати повну автономію від централізованого електропостачання. Що в свою чергу зменшить витрати на утримання та натиск на міське електропостачання.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Дата		31

2.1. Технологія «прозорого» кремнію

Нас сьогодні існує декілька технологій прозорих сонячних елементів, одна з них це розробка вчених з Південної Кореї, з Національного інституту науки і технологій Ульсан. Під час проектування вчені перебрали велику кількість матеріалів, які можна було б використовувати як прозорі сонячні елементи. Але при детальному аналізі ефективності стало зрозуміло, що найкраще для сонячних батарей підходить звичайний кристалічний кремній. На перший погляд ідея зробити кремній прозорим здавалася більш ніж божевільною. Оскільки ніхто раніше не намагався отримати кристалічний кремній з нейтральним, прозорим кольором. Проте знайдене рішення, виявилось дуже простим і умовно кажучи «лежало на поверхні».

Вчені взяли звичайний кристалічний кремній, який за своїми властивостями зовсім не прозорий і зробили в ньому крихітні отвори, які розташовані в заданому порядку завтовшки з волосину людини, діаметром 100 мікрометрів. Що в свою чергу дозволило пропускати через елемент 100% сонячного світла без будь-якої зміни кольору (Рис. 2.2.).

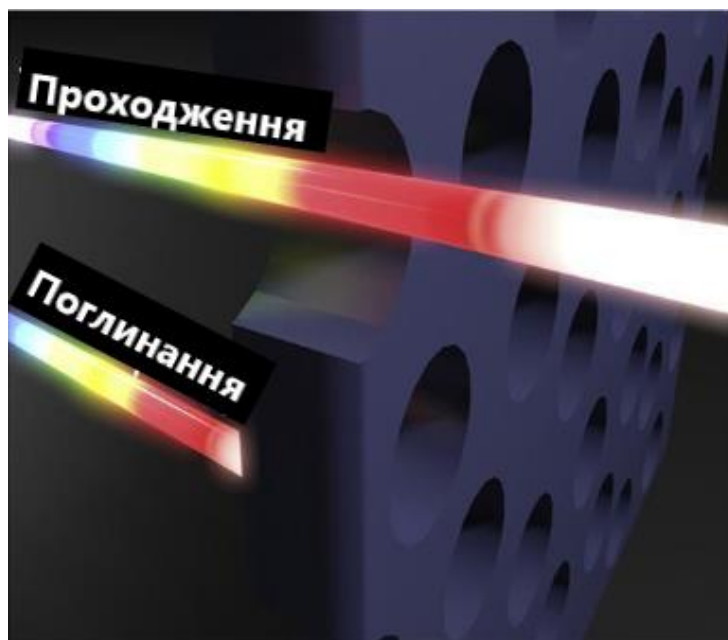


Рис 2.2. Проходження сонячного світла через «дірчастий» кремній

Використання кристалічного кремнію забезпечує технології достатньо високий ККД 12.2% (Рис. 2.3.) у порівнянні з конкурентними прозорими

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Піппис	Лата		32

технологіями в яких ККД на рівні 3-5%, але значно програє в ефективності звичайним непрозорим монокристалічним кремнієвим структурам, в яких ККД на рівні 20-25%.

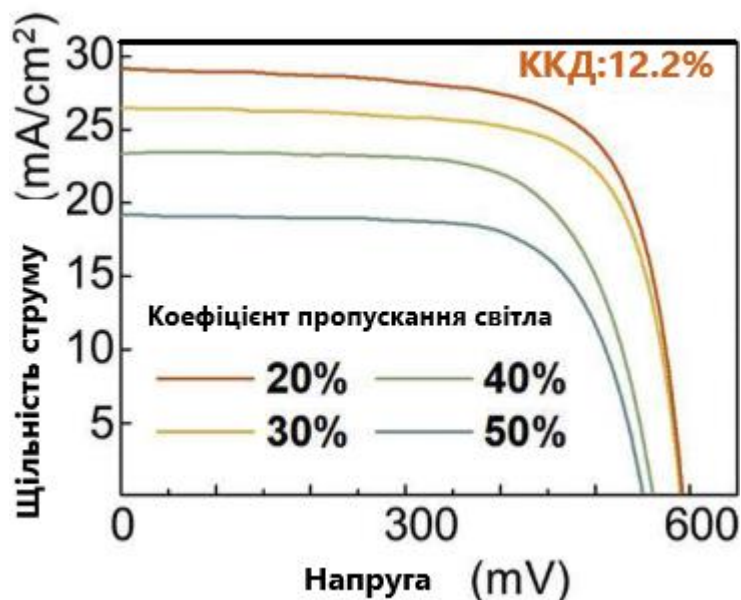


Рис. 2.3. Вольт-амперна характеристика «дірчастого» кремнію

Ще одна дуже цікава та корисна особливість «дірчастого» кремнію була відзначена вченими вже на етапі безпосереднього тестування технології в робочих умовах. Команда встановила розроблений ними прозорий сонячний елемент у шибку вікна. Як показує практика, коли подібні елементи встановлюють вертикально, у наслідок зміни падіння сонячних променів до пологого кута, спостерігається зменшення ефективності генерації електроенергії приблизно на 30%. Але під час експерименту виявилося, що в даній технології «дірчастого» кремнію, падіння генерації не таке значне і складає менш ніж 4%. Що в свою чергу можна віднести до безпосередніх переваг цієї технології.

Наразі вчені продовжують удосконалення досліджуваної технології «дірчастого» кремнію. Наступним етапом розвитку передбачається збільшення ККД до 15%, що в свою чергу збільшить конкурентоспроможність представленої технології на світовому ринку і буде спонукати ширше застосування технології в майбутньому.

Значною комерційною перевагою є те, що процес виготовлення прозорих сонячних батарей на основі «дірчастого» кремнію не потребує переобладнання виробничих ліній, оскільки в основі давно відома та відпрацьована технологія отримання монокристалічного кремнію.

2.1.1. Технологія самоочищення сонячних батарей

Однією з перспективних технологій останніх років, яка здатна суттєво зменшити витрати на обслуговування сонячних батарей є розробка Ізраїльських вчених з Університету імені Бен-Гуріона в Негеві. Дослідники вирішили запозичити технологію самоочищення у квітки лотоса (Рис. 2.4.) шляхом створення відповідного нанотекстурованого покриття.



Рис. 2.4. Стікання крапель води на поверхні лотоса

У дослідженні яке опубліковане в ACS Langmuir команда довела, що змінивши поверхню сонячних елементів можна до 98% скоротити кількість пилу, який накопичується на поверхні елементів, що в свою чергу покращить ефективність генерації електроенергії.

Прилипання пилу до поверхні сонячного елемента завжди було серозною проблемою для отримання електроенергії з використанням фотоелектричних елементів. Вчені помітили, що листя квітки лотоса здатні самостійно очищуватися від пилу та патогенів завдяки розташованій на своїй поверхні нанотекстурі та тонкого гідрофобного воскового шару покриття (Рис. 2.5.).

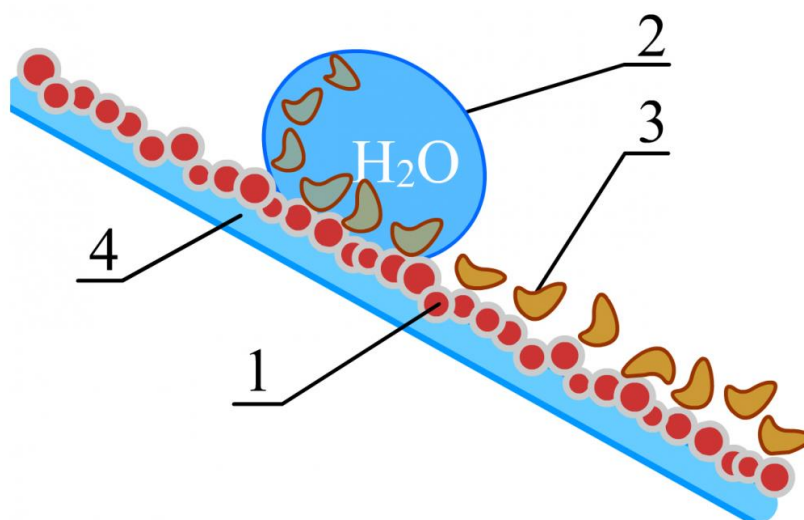


Рис. 2.5. Схема реалізації ефекту лотоса: 1-нанопокриття; 2-крапля рідини; 3-забруднення (пил); 4- поверхня (скло, полімер, кераміка)

За допомогою «вологого» хімічного травлення поверхні з наступним додатковим нанесенням гідрофобного покриття, були отримані 4 тестові зразки: гладкі гідрофільні, нанотекстуровані гідрофільні, гладкі гідрофобні та нанотекстуровані гідрофобні поверхні. Після порівняння тестових зразків, було виявлено фаворита у формі супергідрофобної нанотекстурованої поверхні, яка забезпечує очищення поверхні від пилу на рівні 98%. Що в свою чергу знижують коефіцієнт запилення у 30 разів.

Вищезгадана технологія в перспективі здатна суттєво зменшити витрати на обслуговування сонячних батарей, що в свою чергу збільшує економічний сенс використання сонячних елементів у майбутньому.

2.2. Прозорі сонячні елементи на органічній люмінесцентній основі

Наступна технологія прозорих сонячних елементів завдячує своєю появою команді Мічиганського технологічного університету. Вченим з області фізики та біохімії вдалося створити технологію, яка здатна надати властивості прозорої фотоелектричної панелі будь-якій поверхні з натурального або полімерного скла (Рис. 2.6).

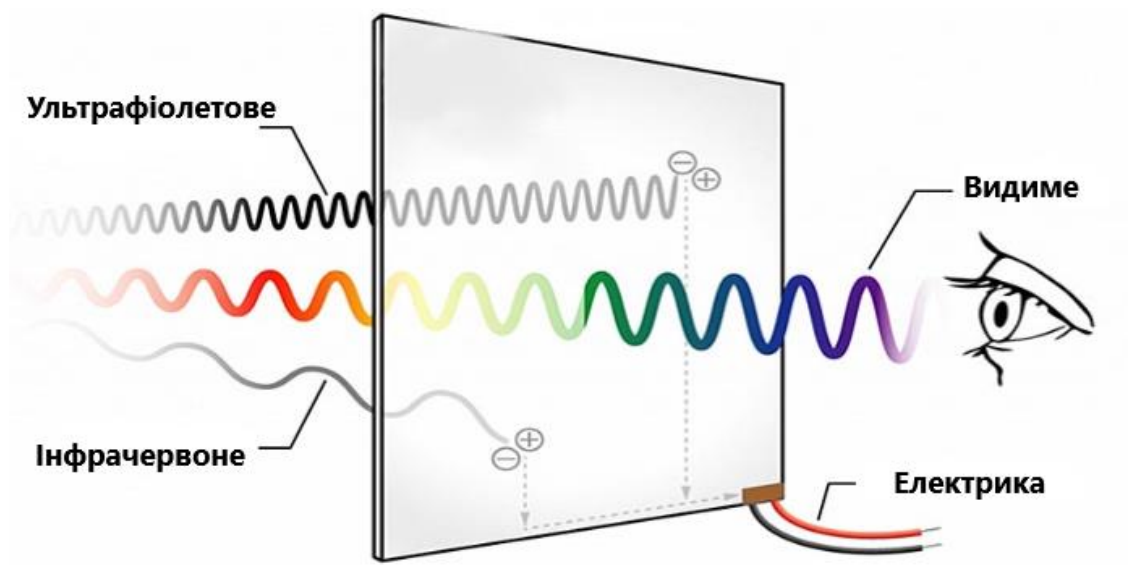


Рис. 2.6. Схематичне зображення прозорого сонячного елемента на органічній люмінесцентній основі

В основі лежить давно відомий процес рослинного фотосинтезу, лише з певними відмінностями, якщо рослини використовують для фотосинтезу видимий спектр світла, то винайдені клітини використовують тільки невидиму частину спектра і складаються зі складних органічних солей (Рис. 2.7).

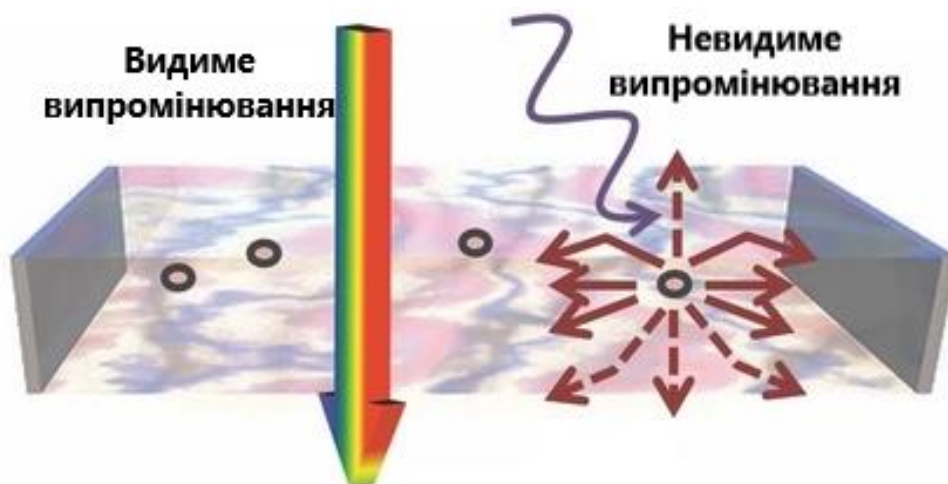


Рис. 2.7. Проходження світла через елемент на органічній люмінесцентній основі

В даній технології перспективним є те, що зміна складу органіки дозволяє генерувати струм з фотонів будь-якої величини енергії та довжини хвилі (Рис. 2.8.). Розроблений професором Лантом набір складних органічних солей запатентовано під назвою «люмінесцентний геліоконцентратор» з аббревіатурою DOI: 10.1002 / adom.201400103.

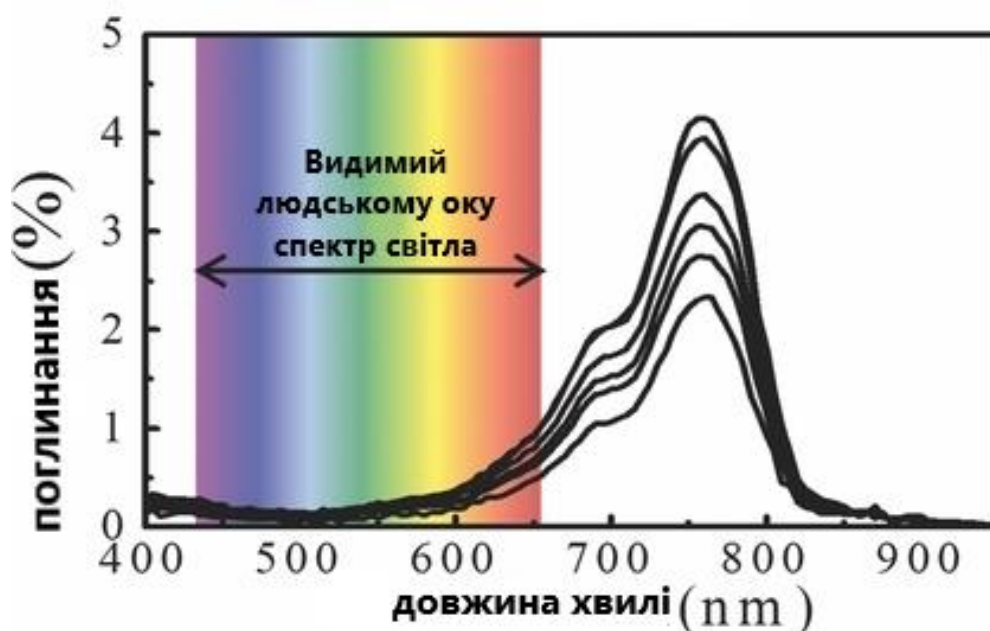


Рис. 2.8. Залежність поглинання від довжини хвилі

ККД даної структури наразі знаходиться на рівні 7.3%, але компенсувати невисокий ККД в переваги до технології можна дуже низькою собівартістю

органічних солей та перспективою можливості інтеграції в усі відомі типи прозорих панелей, як наприклад екрани смартфонів, ноутбуків, електронних книжок, скляних дахів та домашніх вікон (Рис. 2.9.).



Рис. 2.9. Приклад живлення електромотору від прозорого сонячного елемента на органічній люмінесцентній основі

До основних переваг технології прозорих сонячних елементів на органічній основі можна додати ще їх екологічність, так як сам по собі органічний шар не містить будь-яких шкідливих для природи речовин в наслідок чого легко та за дешево утилізується без зайвих проблем.

3. Прозорі сонячні батареї на основі ітербію

Одним з етапів розвитку прозорих сонячних елементів є розробка китайських вчених. Команда вчених з університету «Чангунь» вирішила піти кардинально новим шляхом, а саме не розробкою нового шару покриття, а змінити саму структура скла шляхом додавання в нього наночастинок рідкоземельного елементу а саме ітербію.

Ітербій – це сріблясто-сірий метал, який належить до групи лантановидів (густина 6,96, т-ра плавлення 821 °С, кипіння — 1211 °С) [19].

Відомо, якщо енергія фотонів не відповідає ширині забороненої зони, то кремнієві сонячні елементи втрачають енергію. Якщо енергія фотонів занадто мала, то електрони не здатні набутися достатньої енергії, щоб перейти у зону провідності. Якщо ж навпаки – енергія фотонів зовелика, то надлишок цієї енергії втрачається у формі теплового випромінювання.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		39

3.1. Ефективність прозорих сонячних батарей

Під час досліджень було виявлено, що ітербій не тільки здатний поглинати ультрафіолетові (сині) фотони, а навіть після поглинання виділяє два ІЧ фотони, без будь-якої зміни початкового пучка фотонів. Ця властивість ітербію дозволяє створити унікальну сонячну панель, яка в свою чергу верхнім шаром буде поглинати світло УФ частини спектру і продукувати у два рази більше ІЧ випромінювання (Рис. 3.1). Таким чином команді вчених вдалося створити кардинально новий «люмінесцентний сонячний концентратор» з ефективністю у 160% .

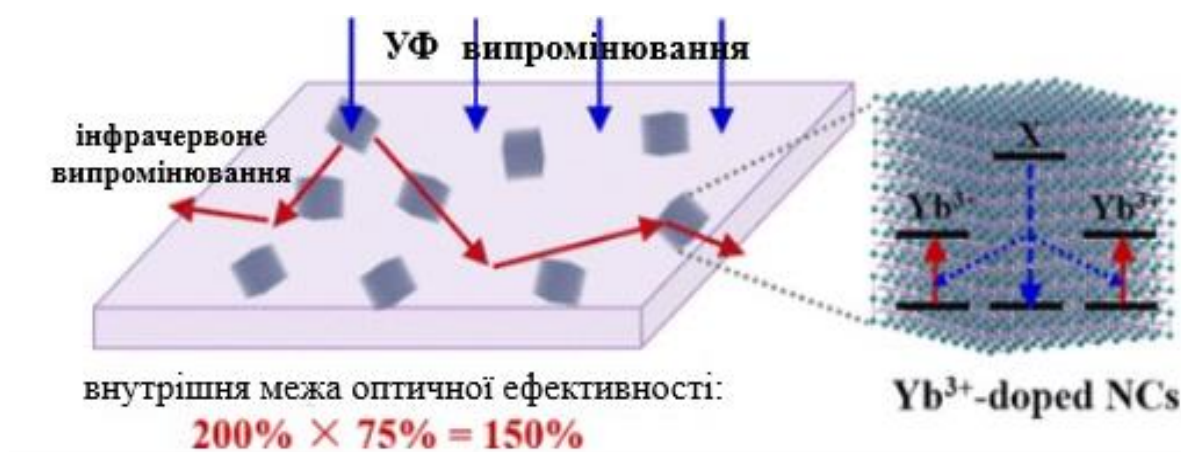


Рис. 3.1. Оптична ефективність скла з наночастинками ітербію

Після потрапляння синього фотону на мікрочастинку ітербію, відбувається виділення ітербієм вже ІЧ фотонів, які входять у площину скла вже під кутом, який дозволяє їм досягти грані скла. Де в свою чергу розташовуються невеликі кремнієві пластинки, які генерують струм поглинаючи ІЧ фотони виділені ітербієм.

Але фактично не зважаючи на те, що оптична ефективні на рівні 160%, отримана структура сонячного модуля малоефективна, її ККД залишається на рівні 3-5%.

Основна проблема в тому, що через прозорість скла, тільки близько 3% синіх фотонів потрапляють на мікрочастинки ітербію, ще додатково додаються втрати на транспортування ІЧ фотонів у площині скла.

Збільшення масштабів застосування технології та майбутній потенціал розвитку, що дозволить взаємодіяти мікрочастинкам ітербію з більшою кількістю синіх фотонів дозволить в майбутньому їй конкурувати на світовому ринку.

3.2. Дослідження властивостей прозорих сонячних елементів

Для зняття спектральної характеристики прозорого сонячного елемента запропоновано побудувати вимірювальний стенд, структурна схема якого зображена на рис. 3.2.

В якості джерела випромінювання, найбільш близького за спектром до сонячного випромінювання, вибрано галогенову лампу. На відміну від звичайної лампи розжарення, галогенова лампа має кварцову колбу, яка пропускає випромінювання у діапазоні $\lambda = 0,2\text{--}3,5$ мкм.

Оскільки фотоприймачів з таким широким спектральним діапазоном фотоприймання не існує, запропоновано використання двох фотоприймачів – Si-фотодіоду з чутливістю у діапазоні $\lambda = 0,1\text{--}1,1$ мкм та InGaAs-фотодіоду з чутливістю у діапазоні $\lambda = 0,8\text{--}2,6$ мкм [29]. Перемикання діапазону фотоприймання здійснюється поворотом дзеркала дзеркального перемикача.

Фотоелектричні сигнали з кожного з фотодіодів підсилюються низькочастотними (НЧ) підсилювачами 1 та 2 і перетворюються аналого-цифровими перетворювачами АЦП 1 та АЦП 2 в цифрову форму.

Перетворені сигнали потрапляють у пристрій введення цифрової інформації, під'єднаний до комп'ютера. У комп'ютері масив отриманих даних обробляється і будується спектральна характеристика прозорого сонячного елемента.

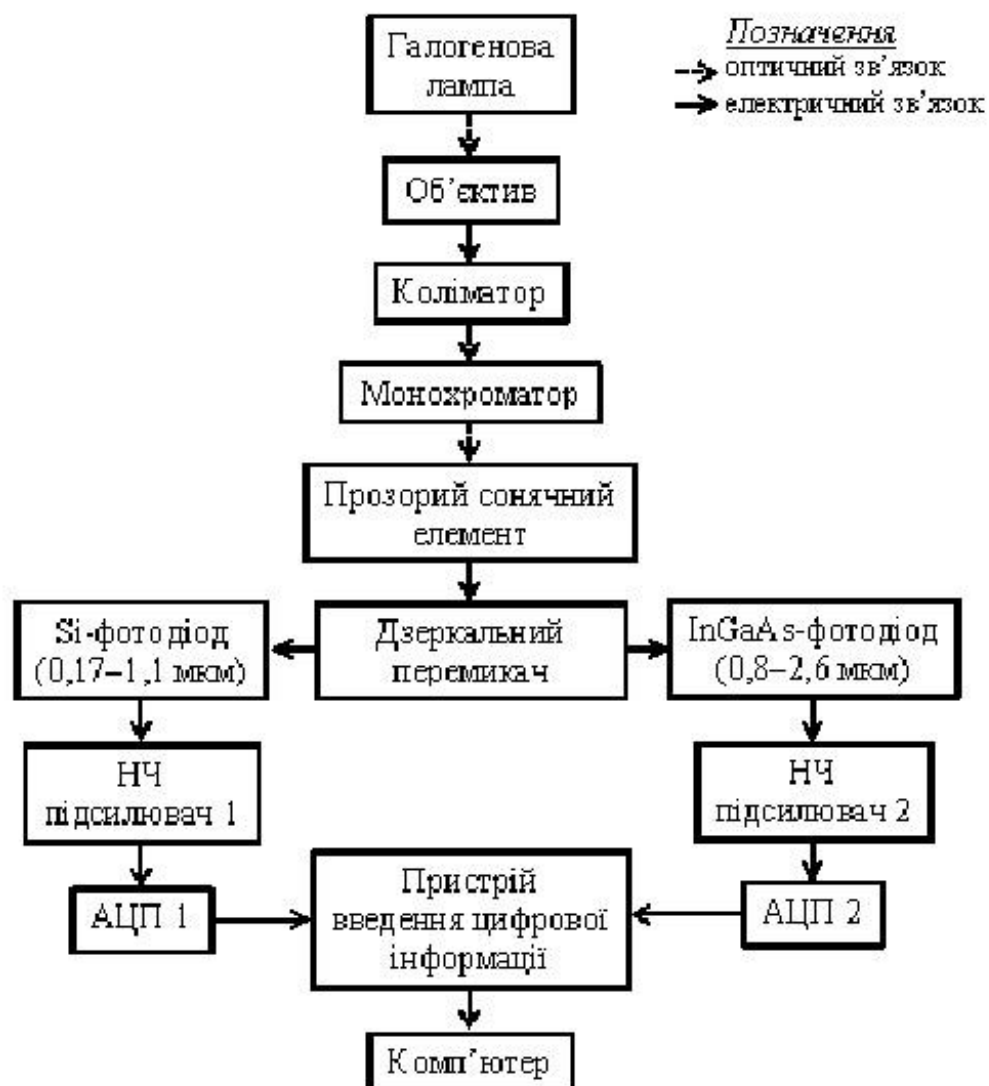


Рис. 3.2 Структурна схема зняття спектральної характеристики прозорого сонячного елемента

3.3. Переваги та недоліки сонячних елементів на основі ітербію

Підсумувавши все вищесказане можна виділити переваги, характерні для наночастинок ітербію:

- зокрема це здатність ітербію після потрапляння на нього одного синього фотону випромінювати вже два фотони інфрачервоного спектру зі зміненим кутом розповсюдження.
- Після взаємодії фотонів синього спектру з ітербієм, випромінюється інфрачервоні фотони з низьким енергетичним станом, які в свою чергу несуть на 60% більше енергії в порівнянні з початковою ультрафіолетовою хвилею.
- Напрямок розповсюдження «нового» потоку фотонів завжди спрямований до рами елемента, де в свою чергу знаходиться кремнієва пластинка, яка поглинає випромінювання.

До переваг прозорих сонячних елементів на основі ітербію, можна віднести:

- Низький вміст ітербію в сонячних панелях, який на перевищує відмітки у 8%.
- Малі розміри наночастинок ітербію у сонячному елементі невидимі для людського ока.
- Низька собівартість ітербію на світовому ринку (\$ 350 за кілограм) у порівнянні з найближчими конкурентами (індій - 400 \$/кг, германій - 1000 \$/кг).
- Сонячні елементи тонкі та як наслідок легкі, що в свою чергу зручно при транспортуванні та встановленні.

Серед недоліків можна відзначити такі, як:

- Низький ККД 3-5%, навіть у порівнянні з конкурентними прозорими сонячними елементами, не беручи вже до уваги кремнієві.
- Маловивчена технологія
- В даній технології тільки близько 3% синіх фотонів потрапляють на мікрочастинки ітербію.

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.4. Розрахунок потенційно можливого використання

Для прикладу розрахунків потенціалу використання технології прозорих сонячних елементів на основі ітербію, було обрано надвисотний хмарочос, який на даний момент є найвищим у світі - це «Бурдж-Халіфа», з висотою 828 метрів та, щонайважливіше в даному контексті, з площею зовнішнього скляного фасаду у 142 000 квадратних метрів [27].

Розрахуємо, яку кількість електричної енергії W можна отримати з такої будівлі за рік, якщо чверть загальної площі застеклення $S = 1,42 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ будуть складати прозорі сонячні елементи з коефіцієнтом корисної дії $\eta_s = 0,04$ та коефіцієнтом оптичних втрат $\eta_{opt} = 0,5$ (в які можна включити забруднення поверхні, похиле падіння випромінювання, хмарність тощо). Енергія сонячного випромінювання, яка падає за рік на 1 м^2 горизонтальної поверхні в таких країнах як ОАЕ або Австралія, сягає $w = 2900 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Таким чином, така будівля, як «Бурдж-Халіфа», може за рік генерувати електричної енергії $W = 0,25 \eta_{opt} \eta_s w S = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,04 \cdot 2900 = 2059000 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 2059 \text{ МВт} \cdot \text{год}$.

Результати розрахунків приблизні, оскільки можливі додаткові втрати генерації електроенергії від кута падіння сонячного випромінювання на поверхню елементу. Також можливі додаткові втрати на транспортування електроенергії до накопичувача близько 1% та втрати під час зберігання і наступної віддачі електроенергії від накопичувача близько 3-7%, втрати від забруднення та затінення сонячного елементу 1-3% .

Але з урахуванням всіх можливих втрат, значення потужності, яку може генерувати лише одна будівля в світі дуже значне. З урахуванням середньорічного споживання електроенергії в Україні на одне господарство, яке складає 2 МВт/рік [30], добутої електроенергії лише з цього одного хмарочосу вистачило б більш як на 1000 домогосподарств.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мисак Й. С. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія / Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, С. П. Шаповал. — Львів: вид-во Львів. політехніки, 2014. — 340 с.
2. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики/ Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников, 2004. – Т.38, вып.8. – с. 937–948.
3. Сонячна енергетика [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_енергетика#%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BA%D1%83%D1%85%D0%BD%D1%8F (дата звернення: 17.03.20)
4. Сонячні батареї монокристал чи полікристал, що краще? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ecoenerhiia.ua/articles/sonjachni-batarei-monokristal-chi-polikristal-shho-krashhe.html> (дата звернення 17.03.20)
5. Виробництво сонячних батарей [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://stimul.kiev.ua/articles.htm?a=virobnitstvo-sonyachnikh-batarey> (дата звернення: 18.03.20)
6. Що таке сонячна енергетика і чому вона актуальна? [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://greentechtrade.com.ua/shho-take-sonyachna-energetyka/> (дата звернення: 18.03.20)
7. Перовскіти – майбутнє фотогальваніки [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://kntu.net.ua/index.php/ukr/content/download/55096/324299/file/2018_3_13.pdf (дата звернення: 18.03.20)
8. Сонячні панелі на перовскітних елементах [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://vir.uan.ua/solar-panel-on-perovskite-elements/> (дата звернення: 30.03.20)

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

9. Солнечные батареи из перовскитах» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://solarb.ru/solnechnye-batarei-iz-perovskita> (дата звернення: 11.04.20)
10. Перовскітні сонячні елементи» [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://vir.uan.ua/perovskite-solar-panels/> (дата звернення: 28.04.20)
11. Прозорі сонячні батареї: чому це перспективно? [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://ruslo.info/uk/tehnologiyi/prozori-soniachni-batareji/> (дата звернення: 10.05.20)
12. Корейські вчені створили прозорі сонячні батареї, якими можна замінити вікна [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://ecotech.news/energy/729-korejski-vcheni-stvorili-prozori-sonyachni-batareji-yakimi-mozhna-zaminiti-vikna.html> (дата звернення: 15.05.20)
13. Scientists punch holes in regular solar cells to make them transparent [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://newatlas.com/materials/scientists-punched-holes-solar-cells-transparent/> (дата звернення: 15.05.20)
14. Створено сонячні панелі, які зможуть замінити вікна: як це працює [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.obozrevatel.com/ukr/green/solar-power/stvoreno-sonyachni-paneli-yaki-zmozhut-zaminiti-vikna-yak-tse-pratsyue.htm> (дата звернення: 15.05.20)
15. Ізраїльські вчені розробили технологію самоочищення сонячних батарей [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://ecotech.news/energy/715-izrajilski-vcheni-rozrobili-tekhnologiyu-samoochishchennya-sonyachnikh-batarej.html> (дата звернення: 17.05.20)
16. Революційні прозорі сонячні батареї для вікон» [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://greentechtrade.com.ua/revolyutsijni-prozori-sonyachni-batareyi-dlya-vikon/> (дата звернення: 18.05.20)
- 17.«Near-infrared harvesting transparent luminescent solar concentrators» [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adom.201400103> (дата звернення: 18.05.20)

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

18. Новые прозрачные солнечные элементы способны сделать окна эффективными генераторами электроэнергии [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/3760-novye-prozrachnye-solnechnye-elementy-sposobny-sdelat-okna-effektivnymi-generatorami-elektroenergii.html> (дата звернення: 18.05.20)
19. Ітербій» [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://uk.wikipedia.org/wiki/Ітербій> (дата звернення: 18.05.20)
20. Прозрачные солнечные панели — новая попытка от китайских ученых [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://habr.com/ru/company/madrobots/blog/433262/> (дата звернення: 18.05.20)
21. Milstein, T. J.; Kroupa, D. M.; Gamelin, D. R. Nano Lett. 2018, 18, 3792-3799.
22. Wu, K.; Li, H.; Klimov, V. I. Nat. Photon. 2018, 12, 105-110.
23. Li, H.; Wu, K.; Lim, J.; Song, H.-J.; Klimov, V. I. Nat. Energy 2016, 1, 16157.
24. Currie, M. J.; Mapel, J. K.; Heidel, T. D.; Goffri, S.; Baldo, M. A. Science 2008, 321, 226-228.
25. Bradshaw, L. R.; Knowles, K. E.; McDowall, S.; Gamelin, D. R. Nano Lett. 2015, 15, 1315-1323.
26. Green, M. A.; Emery, K.; Hishikawa, Y.; Warta, W.; Dunlop, E. D.. Prog. Photovoltaics 2014, 22, 701-710.
27. Как моют самый высокий в мире небоскрёб? [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://www.domovenok.ru/articles/144> (дата звернення: 19.05.20)
28. Украинцы потребляют электроэнергии в два раза меньше европейцев [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://delo.ua/business/ukraincy-potreblajut-elektroenergii-v-dva-raza-351827> (дата звернення: 19.05.20).
29. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання. Книга перша [Электронный ресурс] – Режим доступа https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31034/3/V_Chadyuk_Optoelectronics_Vol_2_book_1.pdf

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк.
						47
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

30. Ливчак В. И. Нормирование показателей годового электропотребления жилыми домами, в том числе на общедомовые нужды [Электронный ресурс] – Режим доступа https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6193

					ДП.ДЕ62.010.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

S U M M A R Y

Transparent solar cells

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Instruments and Devices Ulizko Yuriy Vitaliyovych. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-62. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 50 p., Ill. 26.

Keywords: photocell, solar cell, silicon, single crystals, polycrystals, translucent solar cells, transparent solar cells.

Summary of the project:

Since ancient times humanity tried to use inexhaustible resources given by nature. The main such resource was the energy of the sun, because the rivers have dried up and dependent on rainfall, the recovery of trees required years, and the land eventually began to give less yields. In turn, the sun Shine always.

To the first attempts to use the sun's energy can be attributed to an ordinary magnifying glass or better to say, a collective optical lens. For those distant times when the optics almost knew nothing, it was just a revolutionary invention that allowed to fire in almost any conditions, the main thing that the sun was shining.

Much earlier, with the help of the sun, a basis was established for glass products, as historical data indicate, first planline glass was obtained accidentally when the sand that the wind blew the boat in certain circumstances, have melted somewhere on the banks of the river Nile under the scorching sun of Egypt. This case was another proof for the original population that solar energy can be used for their own benefits and most importantly, how it is not used, its number is not reduced, and the next day, "the sun will rise again stobry and its rays will be the same hot and passionate to everyone on earth".

The main principle of evolution is that it never stands still and does not avoid any of the industries side. In any case, she is making adjustments, whatever the nature. It all depends on time, sometimes evolution supports technology and encourages them to develop, suggesting new ways of implementation. However, any technology sooner or later it comes time to go down in history, as it has already made a significant contribution to the development and it comes time to replace it with the following solution.

Thus, as a result of many evolutionary changes and even more changes in technology, mankind came to the invention of the photovoltaic cell.

"A photovoltaic cell, also a solar cell, a solar cell, a photovoltaic cell, a photocell, a photoelectric converter (PVC) is an electrical device that acts as a converter and is used to convert part of light energy (usually visible and infrared electromagnetic waves) into electricity by photoelectric effect "

One of the types of photovoltaic cells is the so-called "solar cell" - the main property of which is - the conversion of solar radiation into electricity.

The first known solar cells to be widely used in the world were opaque silicon-based solar cells.

The first chapter considers the evolutionary chronology of the appearance and development of initially opaque solar cells, namely primarily solar cells based on monocrystalline silicon (Pic. 1), which at one time, despite the technological complexity and economic high cost, were a significant breakthrough for science.

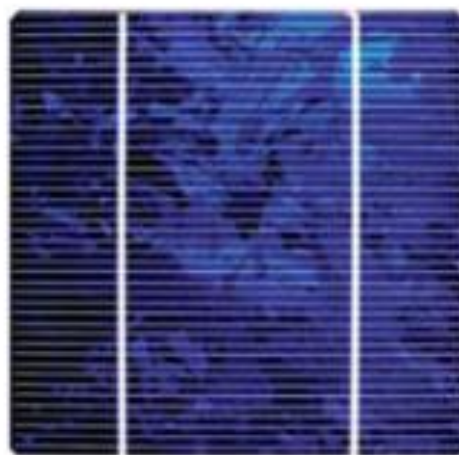


Pic. 1. Monocrystalline solar cell

Directly, the process of making a single crystal of silicon is that pure silicon with a minimum amount of impurities and a high mass content of silicon dioxide melts in a large crucible under the action of a high temperature of about 1415 °C. A silicon rod is then added to the molten silicon crucible as a sample of the future crystal. As a result, the process of forming a new crystal around the rod begins, during which the rod and the crucible rotate in different directions. The use of a sample of silicon allows to obtain a homogeneous crystal, as the atoms growing layer by layer on a kind of base form a clear structure. The process itself is quite long, but the result is worth it, because it forms a large, homogeneous crystal, which has the highest efficiency in its niche, 20-25%.

However, the "first" technology in the initial stages had a significant economic disadvantage in the form of high cost and complexity of manufacturing processes associated with the need to use only pure silicon, which entailed significant costs. Which in the future prompted the emergence of new technology.

The next evolutionary step in the niche of opaque solar cells did not take long and the simplification of production technology led to the emergence of polycrystalline solar cells. (Pic. 2.)



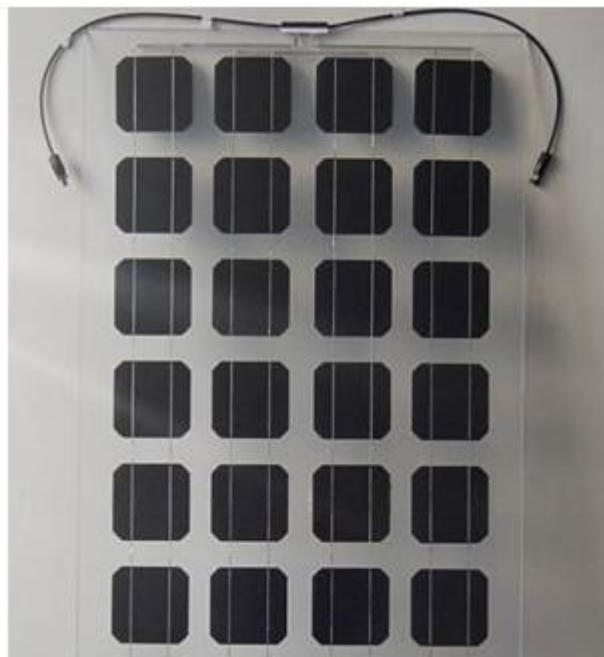
Pic. 2. Polycrystalline solar cells

The main essence of the method is that in contrast to the growth of a single crystal of silicon, the technology of interaction of a vapor-gas mixture of hydrogen and silane with the surface of silicon ingots heated to a temperature of 650-1300 °C,

followed by deposition of free silicon. As a result, silicon atoms are released, which in turn during slow cooling form a crystal with a tree-like (dendritic) structure. As a result, polycrystalline silicon is obtained, which is a combination of many different crystals that form a single module. A noticeable difference is the unusual glare of "metal flakes".

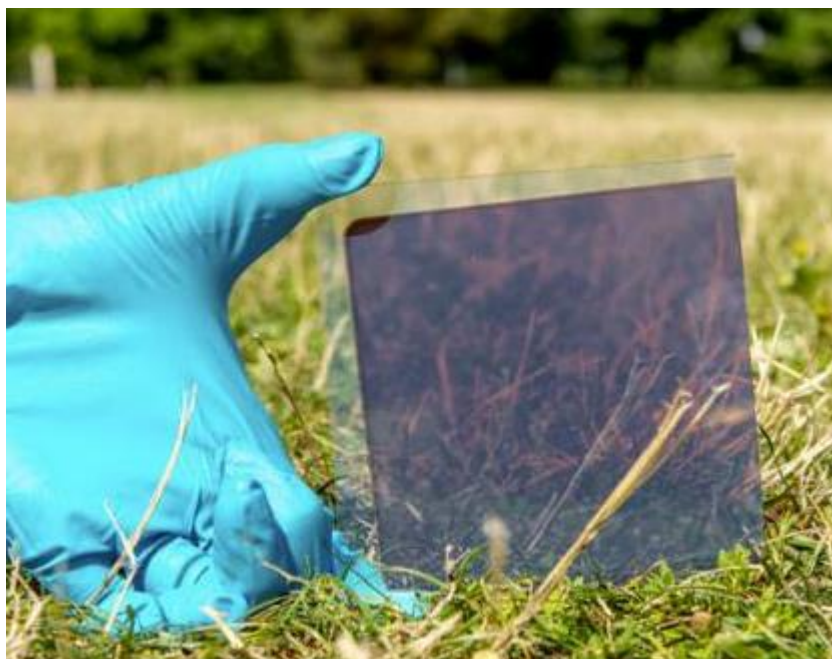
Simplification of silicon production technology had a positive effect on the cost of the final product, but also encouraged a reduction in efficiency to 12-18%.

The next transition to translucent solar panels was a technological attempt to create a silicon-based translucent element. (Pic. 3.) This decision was a bit strange, but did not receive support and widespread use, but gave impetus to the search for new materials that would be at least translucent and could generate electricity.



Pic. 3. silicon-based translucent element

A full-fledged second stage in the development of solar cells was the abandonment of the use of silicon and its replacement by new structures, in particular perovskite. (Pic. 4.)



Pic. 4. Solar element based on perovskite

Perovskite solar cells is a fundamentally new type of photovoltaic devices that scientists in the near future, will provide worthy competition in the world market of green energy is widely used solar cells based on silicon.

By itself, the technology application perovskite is less expensive, because the process of applying perovskite occurs at significantly lower temperature to 300°C , and is usually $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$. That in turn allows to apply perovskite not only on glass, and even polymer film. There are two common methods of applying a layer perovskite to the substrate, using the evaporation and inkjet printing. Unlike silicon wafers which are rigid and thick, perovskite thin film.

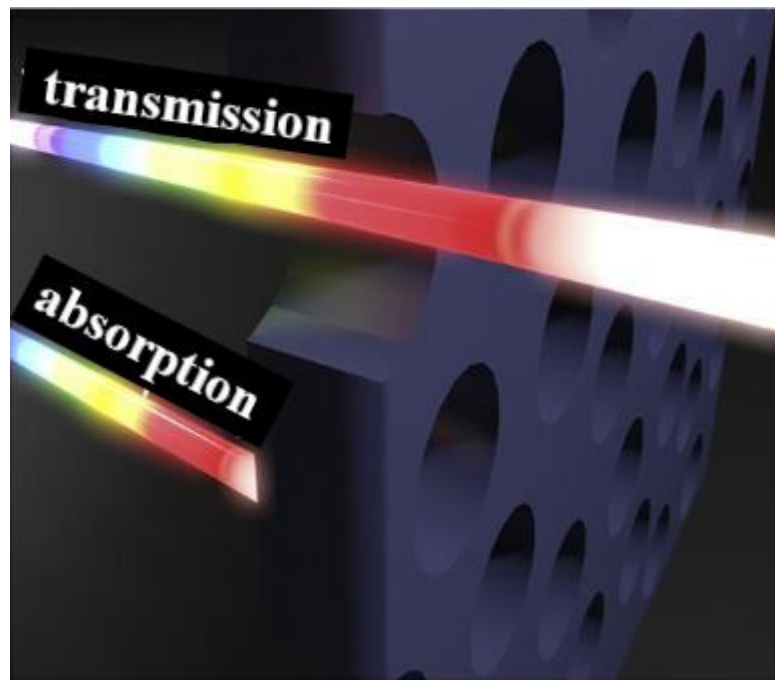
Perovskite the first solar cells had an efficiency of only 4-5%, but with time and the development of the peculiarities of production technologies, scientists have been able to raise it to the values from 12% to 18%, while maintaining light transmission of more than 10% .

Mainly in connection with the plasticity perovskite solar cells, scientists predict that in the near future they will be able to completely replace the usual silicon with the market.

The second Chapter describes the third stage in the development of solar cells, namely, transparent solar cells, their main types, characteristics, advantages and disadvantages.

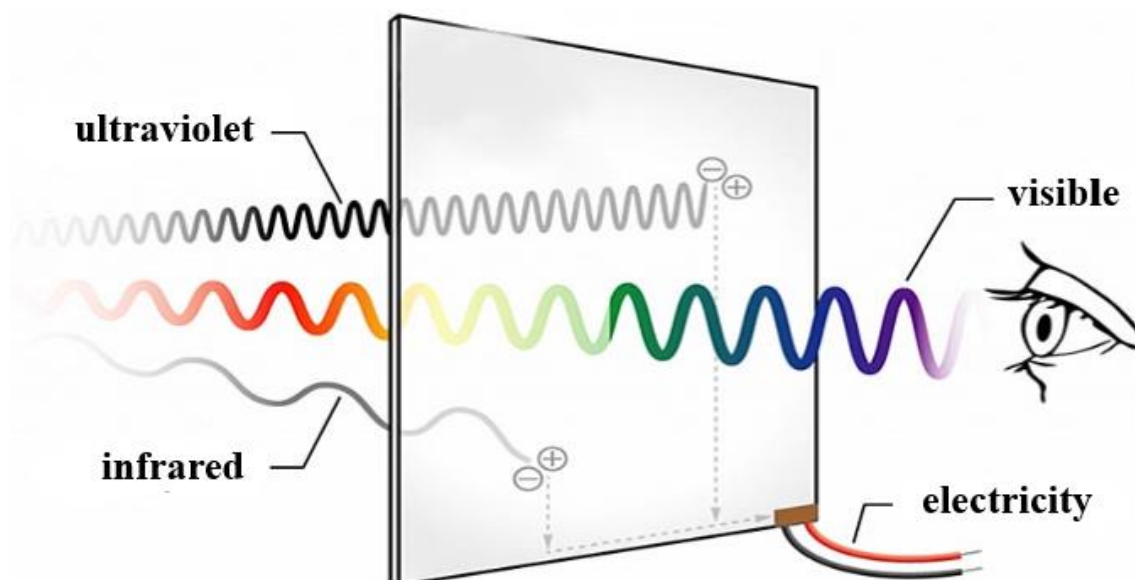
Now it is the youngest technology and today it is at the initial relatively speaking "laboratory" stage of development. The main drawback of the technology is the low efficiency of transparent solar cells, about 5-10%.

The main representatives of technological solutions in the niche of transparent solar cells technology is "transparent" or "perforated" silicon, which uses monocrystalline silicon in which in a predetermined order made holes the thickness of a human hair with a diameter of 100 microns, which allows light to completely pass through the element while maintaining an efficiency level of 12%. (Pic. 5.)



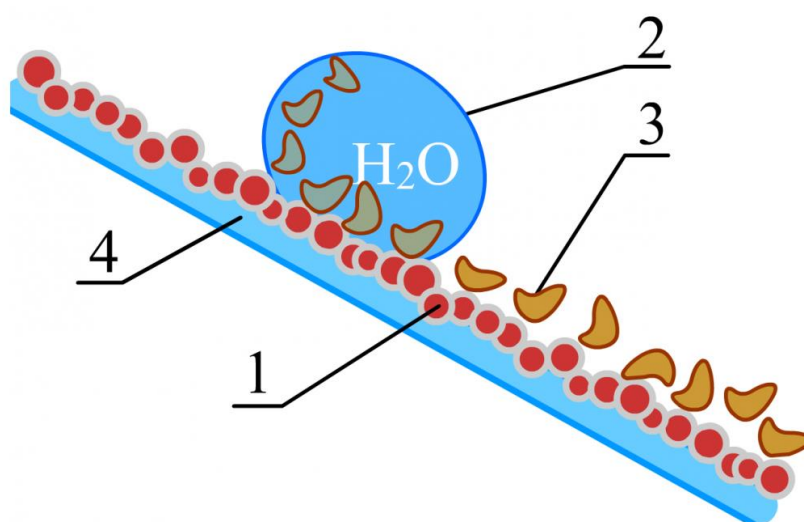
Pic. 5. The passage of sunlight through the "perforated" silicon

The following "transparent" technology uses a special coating. It is based on the long-known process of plant photosynthesis, with only some differences, if plants use the visible spectrum of light for photosynthesis, the invented cells use only the invisible part of the spectrum (Pic. 6.) and consist of complex organic salts, but their efficiency is slightly lower and is 7.3%;



Pic. 6. Schematic representation of a transparent solar cell on an organic luminescent basis

Also in the second chapter there is an overview of the technology that can solve the problem of surface contamination of solar cells by self-cleaning. The researchers decided to borrow the technology of self-cleaning from lotus flowers (Pic. 7) by creating a suitable nanotextured coating, which in turn will improve the efficiency of electricity generation.



Pic. 7. Scheme of realization of lotus effect: 1-nanocoating; 2 drops of liquid;
3-pollution (dust); 4- surface (glass, polymer, ceramics)

The third chapter discusses the technology of transparent solar cells based on ytterbium. Studies have shown that ytterbium is not only able to absorb ultraviolet (blue) photons, but even after absorption emits two infrared photons, without any

change in the initial photon beam. This property of ytterbium allows you to create a unique solar panel, which in turn the upper layer will absorb light from the ultraviolet part of the spectrum and produce twice as much infrared radiation.

The possibility of applying laboratory technology in practice is also considered. As a result of calculations the value of quantity of the electric power on an actual example is received. In particular, if we replace the glass with transparent solar cells based on ytterbium only on a quarter of the glass facade of the Burj Khalifa skyscraper, this energy would be enough to supply electricity to more than 1,000 households in Ukraine.

Summarizing all the above, we can say with confidence that the solar cells in any of their implementations are the future. It should be noted that individual solar cells have low efficiency, but the combination of several different technologies with emphasis on their benefits, will gain some autonomy for humanity.

Перш. викорис.

Довід. №

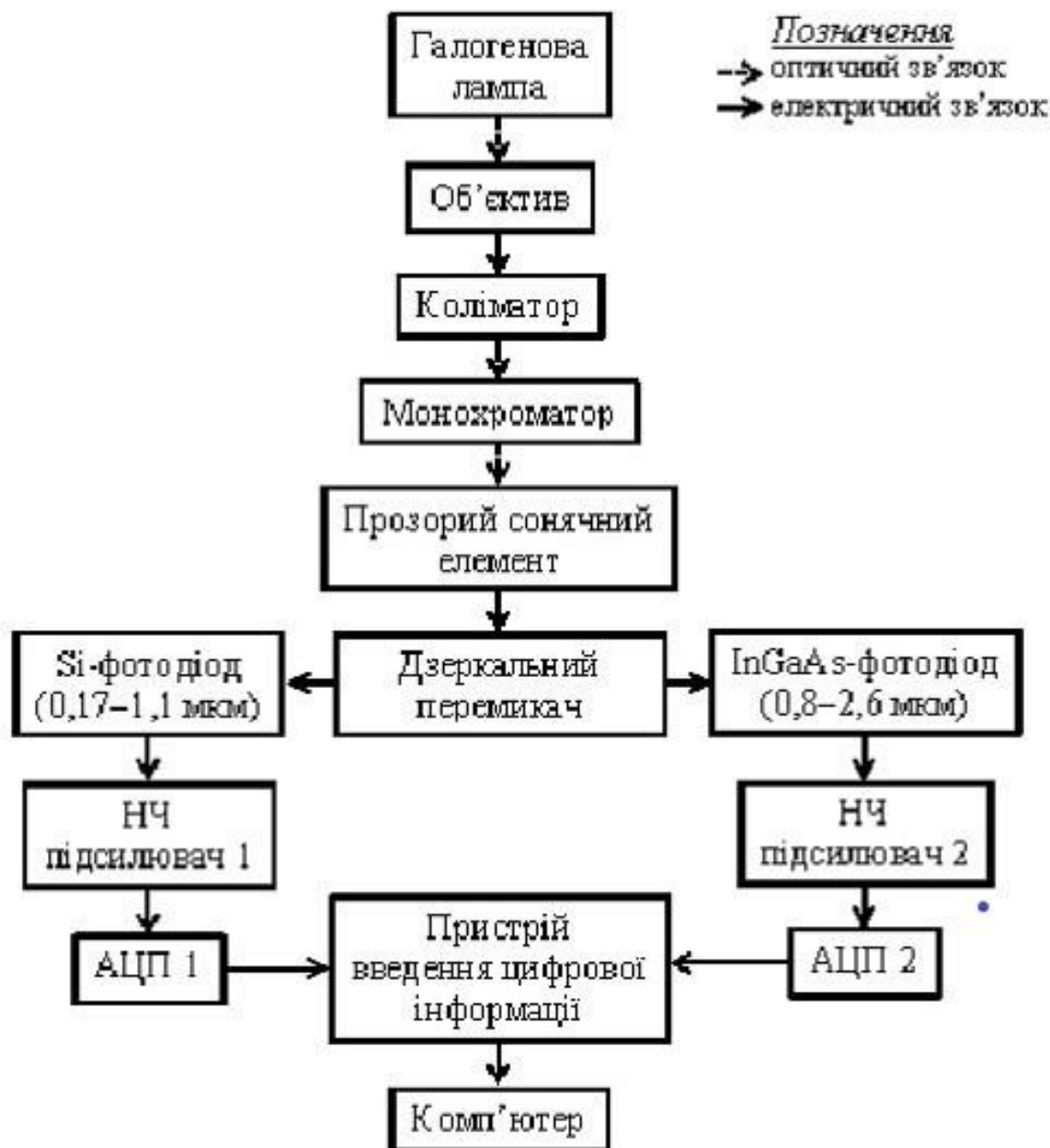
Підпис і дата

Инв. № дубл.

Зам. инв. №

Підпис і дата

Инв. № ориг.



ДП.ДЕ62.010.000 Е1

Прозорі сонячні елементи. Схема структурна.

Літ.

Маса

Масштаб

Арк.

1

Аркушів

1

1

КПІ ім. Ігоря Сікорського,
ФЕЛ, ЕПС, ар. ДЕ-62